

บทที่ 4 ผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมมาใช้งานกับส่วนดำเนินการอยู่ 2 ชนิด คือ ส่วนดำเนินการที่เป็นเชิงเส้น [22] และส่วนดำเนินการที่ไม่เป็นเชิงเส้น [15] โดยผลการทดลองแสดงได้ดังนี้

4.1 ผลการทดลองที่ได้จากส่วนดำเนินการที่เป็นเชิงเส้น

4.1.1 คุณลักษณะของส่วนดำเนินการ

ส่วนดำเนินการนี้มีสมการการถ่ายโอนเป็น

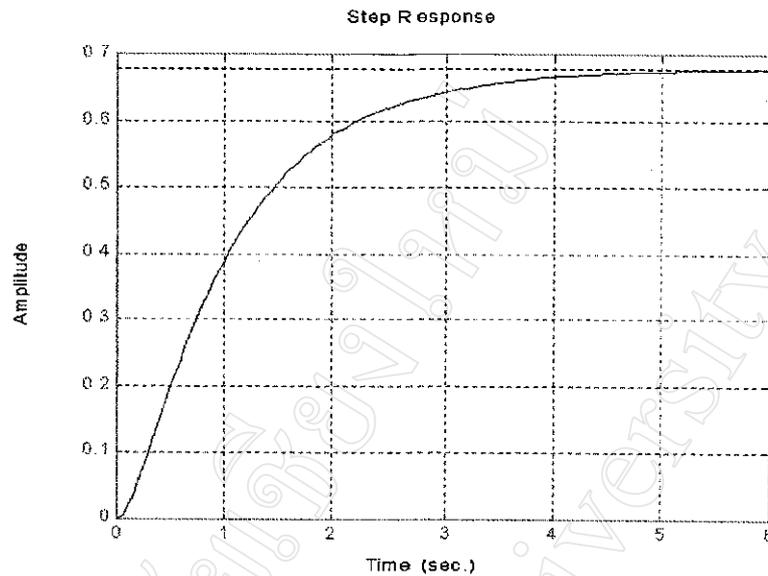
$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{4.3}{s^2 + 7.31s + 6.33} \quad (1)$$

เมื่อ U เป็นสัญญาณที่ป้อนให้กับส่วนดำเนินการ และ Y เป็นสัญญาณที่ได้จากส่วนดำเนินการ



รูปที่ 4.1 สัญญาณขาเข้า และ สัญญาณที่ได้จากส่วนดำเนินการ

จากรูปที่ 4.1 เมื่อวิเคราะห์หาคุณลักษณะของส่วนดำเนินการโดยใช้ คำสั่ง “step (.....)” ใน MATLAB ซึ่งใช้วิเคราะห์ส่วนดำเนินการ โดยให้สัญญาณขาเข้าเป็น unit step จะได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้



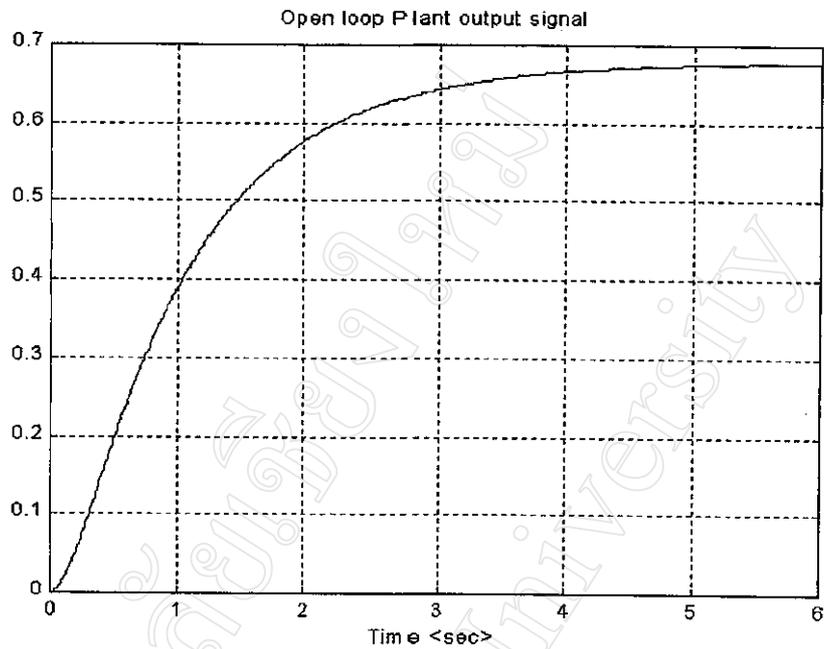
รูปที่ 4.2 ผลการตอบสนอง $y(t)$ ของส่วนดำเนินการที่ได้จาก unit step โดยใช้คำสั่ง “step(...)”

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าส่วนดำเนินการนี้มีค่าดัชนีที่ใช้บอกประสิทธิภาพของระบบเป็นดังนี้

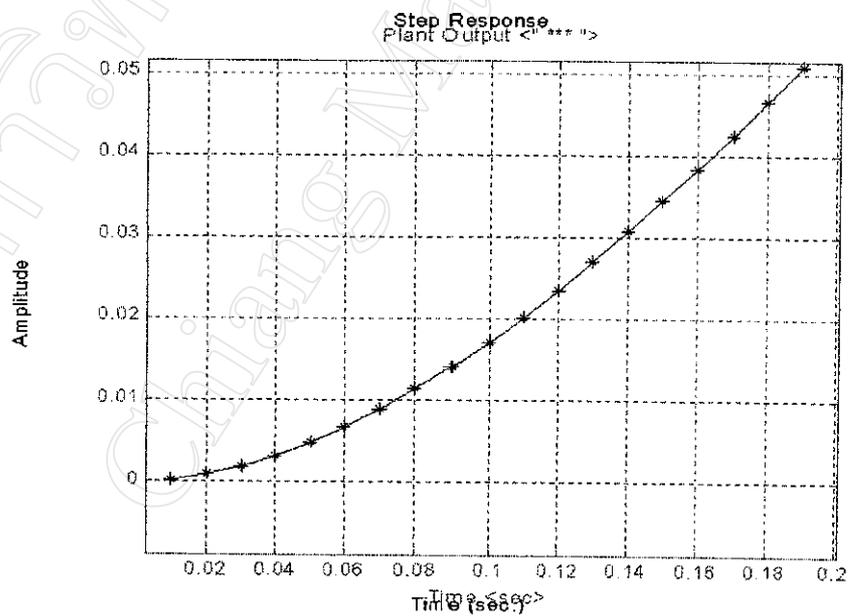
ตารางที่ 4.1 ค่าดัชนีของส่วนดำเนินการโดยสัญญาณขาเข้าเป็น unit step

ดัชนี	ค่า
Steady state output	0.678
Steady state error	0.322
Rise time(ที่ 90%ของ ค่าเสถียร)	2.405(วินาที)
Setting time	5.5(วินาที)
% Over shoot	ไม่มี

เมื่อให้ระบบจำลองที่สร้างขึ้นวิเคราะห์หาผลการตอบสนองของส่วนดำเนินการ โดยให้สัญญาณขาเข้าเป็น unit step และความถี่ของการสุ่มสัญญาณเป็น 100 ครั้งใน 1 วินาที ผลการตอบสนองที่ได้แสดงในรูปที่ 4.3



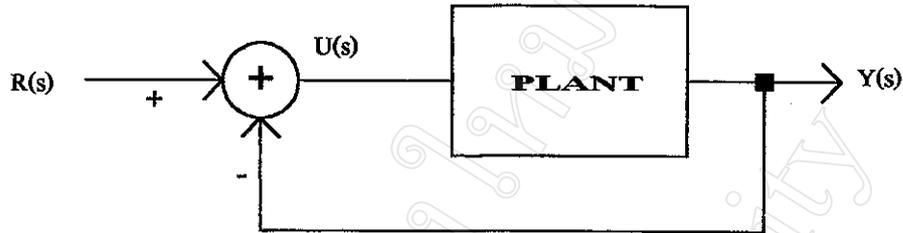
รูปที่ 4.3 ผลการตอบสนองของส่วนดำเนินการที่ได้จาก unit step จากระบบจำลอง



รูปที่ 4.4 ผลการตอบสนองของส่วนดำเนินการที่ได้จาก unit step โดย “***” ได้จากระบบจำลอง และ เส้นที่ป ได้จาก คำสั่ง “step(...) ใน MATLAB”

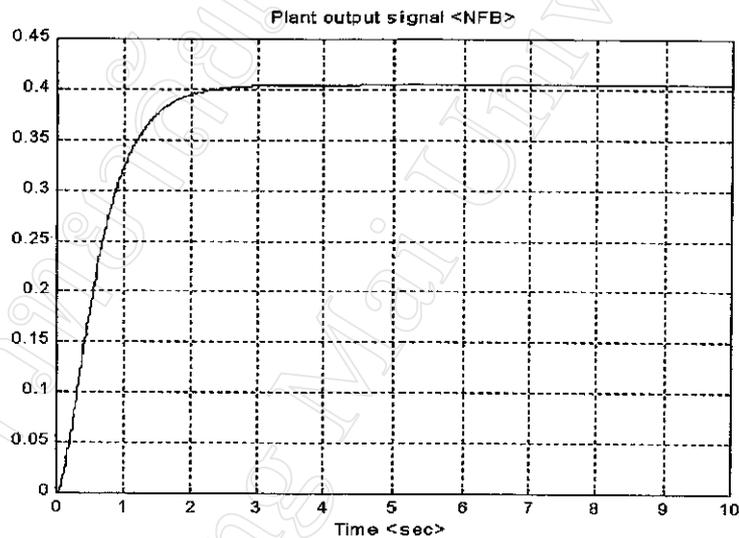
จากรูปที่ 4.4 พบว่าผลการตอบสนองของส่วนดำเนินการที่ได้ทั้งจากคำสั่ง “step(...)” และที่ได้จากระบบจำลองที่สร้างขึ้นสำหรับการวิจัย ได้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก

เมื่อทดลองต่อส่วนดำเนินการให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณควบคุมเป็นสมการของสัญญาณขาออกที่ถูกป้อนกลับแบบลบมารวมกับสัญญาณอ้างอิง(รูปปิด) ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ระบบควบคุมแบบรูปปิดเมื่อไม่มีอุปกรณ์ชดเชย

เมื่อให้ $R(s)$ เป็น unit step จะ ได้ผลการทดลองจากระบบจำลองได้ดังนี้



รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองของส่วนดำเนินการ $y(t)$ ในกรณีที่ระบบควบคุมเป็นรูปปิด และไม่มีอุปกรณ์ชดเชย

ผลการทดลองในรูปที่ 4.6 สามารถสรุปออกมาได้เป็นค่าดังนี้ที่ใช้บอกคุณสมบัติดังนี้

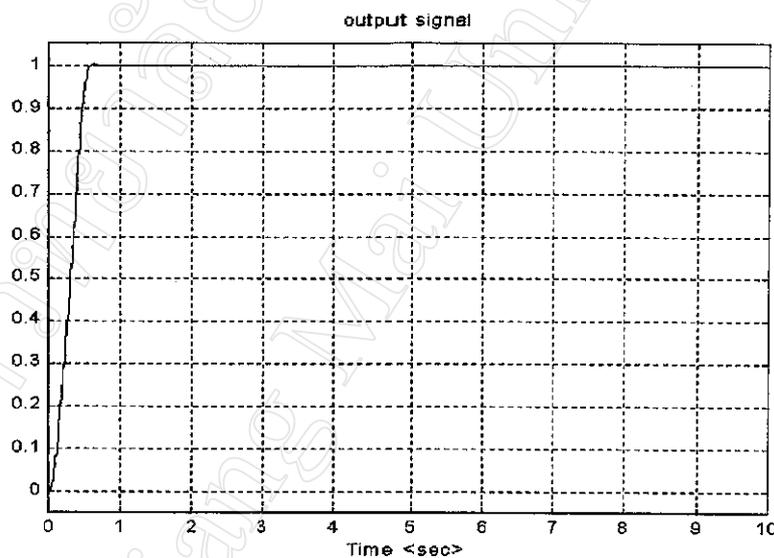
ตารางที่ 4.2 ค่าดัชนีของส่วนดำเนินการ โดยสัญญาณขาเข้าเป็น unit step ในกรณีของรูปปิด

ดัชนี	ค่า
Steady state output	0.4045
Steady state error	0.5955
Rise time(ที่ 90%ของ ค่าเสถียร)	1.34(วินาที)
Setting time	4.0(วินาที)
% Over shoot	ไม่มี

พิจารณาจากผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.2 กับ ผลการทดลองในตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อส่วนดำเนินการใช้การควบคุมแบบรูปปิดโดยที่ไม่มีอุปกรณ์ชดเชยจะให้ผลการตอบสนองที่เร็วกว่า แต่ steady state error ที่ได้จะมีค่ามากกว่าส่วนดำเนินการที่ไม่มีการต่อระบบควบคุมแบบรูปปิด

4.1.2 ผลการตอบสนองของส่วนดำเนินการที่ได้จากระบบควบคุมในเอกสารอ้างอิง

ส่วนดำเนินการนี้ได้ถูกเลือกมาใช้กับระบบควบคุมโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีการเรียนรู้แบบ genetic เพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมที่ได้ออกแบบขึ้น ผลการตอบสนองของระบบควบคุมสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.7 สัญญาณขาออกที่ได้จากส่วนดำเนินการ $y(t)$ โดยใช้ระบบควบคุมที่ใช้อ้างอิง

รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณขาออกที่ได้จากระบบควบคุมในเอกสารอ้างอิง โดยสัญญาณนี้ได้มาจากการทำตามระบบควบคุมที่ได้แสดงในเอกสารอ้างอิง[22] ซึ่งในเอกสารอ้างอิงได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองและคำนวณทั้งหมด และบอกการทำงานของระบบควบคุมไว้อย่างละเอียดทำให้สามารถทำตามได้โดยง่าย กรณีนี้ใช้สัญญาณอ้างอิงเป็น unit step ความถี่ในการสุ่มสัญญาณทั้งหมด 100 ครั้ง ในเวลา 1 วินาที (ตามความถี่การสุ่มที่ใช้ประกอบการจำลองในเอกสารอ้างอิง) จากสัญญาณที่ได้สามารถวิเคราะห์ผลการตอบสนองได้ดังนี้

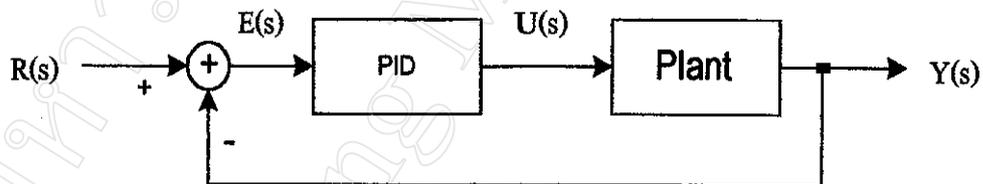
ตารางที่ 4.3 ค่าดัชนีของส่วนดำเนินการที่ได้จากระบบควบคุมในเอกสารอ้างอิง โดยสัญญาณขาเข้าเป็น unit step

ดัชนี	ค่า
Steady state output	0.9998
Steady state error	0.0002
Rise time(ที่ 90%ของ ค่าเสถียร)	0.475(วินาที)
Setting time	0.95(วินาที)
% Over shoot	0.542%

ผลการทดลองที่ได้นี้จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับระบบควบคุมที่ได้จากงานวิจัย โดยใช้สัญญาณอ้างอิงเดียวกัน

4.1.3 ผลการตอบสนองของส่วนดำเนินการจากอุปกรณ์ชดเชยแบบ PID

ระบบควบคุมโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยแบบ PID ที่นำมาใช้กับส่วนดำเนินการอ้างอิงมีโครงสร้างโดยรวมดังนี้



รูปที่ 4.8 โครงสร้างระบบควบคุมที่ใช้ที่ใช้อุปกรณ์ชดเชยแบบ PID

ระบบควบคุมตามโครงสร้างในรูปที่ 4.8 ได้ปรับค่าตัวแปรทั้ง 3 ค่าของอุปกรณ์ชดเชย (P, I และ D) ตามกฎการปรับที่ได้กล่าวในบทที่ 2 แล้วก็ได้ทำการปรับค่าอีกเล็กน้อยซึ่งค่าตัวแปรทั้ง 3 มีค่าตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าตัวแปรของอุปกรณ์ชดเชยแบบ PID ที่ได้จากการปรับ

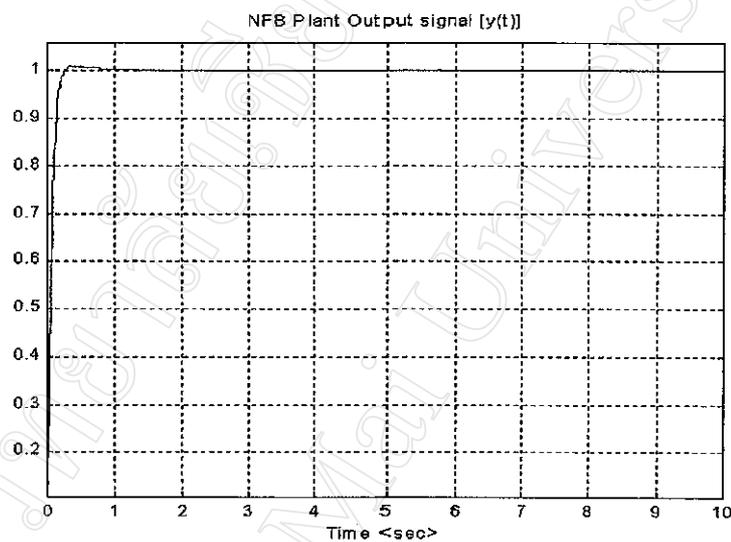
P	27.354
I	28.149
D	3.625

ซึ่งอุปกรณ์ชดเชยแบบ PID นี้มีสมการถ่ายโอนเป็น

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{Ds^2 + Ps + I}{s} \quad (2)$$

เมื่อ $U(s)$ เป็นสัญญาณความคุมที่จะส่งไปยังส่วนดำเนินการ และ $E(s)$ เป็นสัญญาณข้อผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณที่ได้จากส่วนดำเนินการ

ผลการตอบสนองของระบบต่อสัญญาณขาเข้าที่เป็น unit step สามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.9 ผลการตอบสนองที่ได้จากระบบควบคุม $y(t)$ ที่ใช้อุปกรณ์ชดเชยแบบ PID

สัญญาณขาออกจากส่วนดำเนินการที่แสดงในรูปที่ 4.9 นี้ใช้สัญญาณอ้างอิงเป็น unit step ความถี่ในการสุ่มสัญญาณทั้งหมด 100 ครั้ง ในเวลา 1 วินาที และจากสัญญาณที่ได้สามารถวิเคราะห์ผลการตอบสนองได้ดังนี้

ตารางที่ 4.5 ค่าดัชนีของส่วนดำเนินการที่ได้จากระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งใช้อุปกรณ์ชดเชยแบบ PID โดยสัญญาณขาเข้าเป็น unit step

ดัชนี	ค่า
Steady state output	1.00000005352253
Steady state error	5.352×10^{-8}
Rise time(ที่ 90%ของ ค่าเสถียร)	0.128(วินาที)
Setting time	1.5(วินาที)
% Over shoot	0.89642%

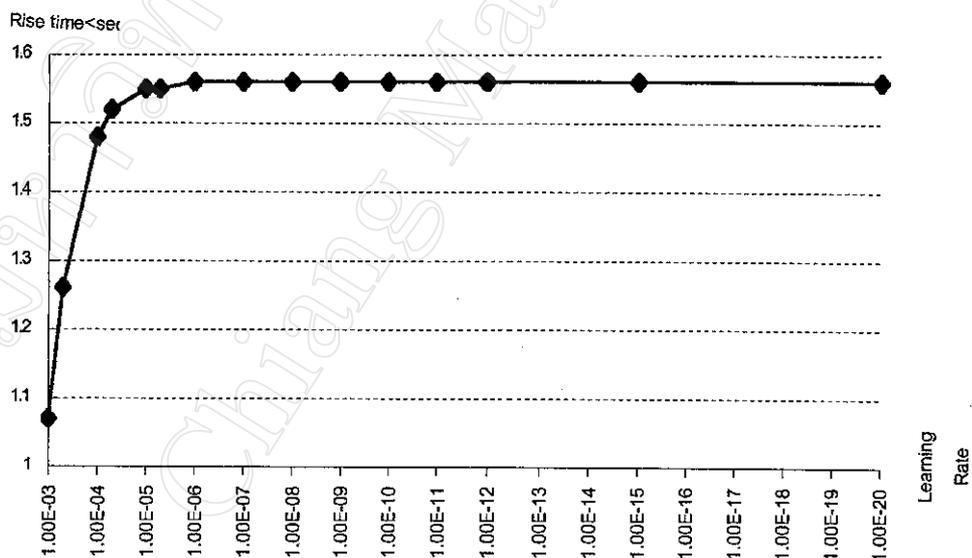
ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับระบบควบคุมที่ได้จากงานวิจัย เช่นเดียวกับผลการตอบสนองที่ได้จากระบบควบคุมอ้างอิง

4.1.4 ผลการทดลองที่ได้จากระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

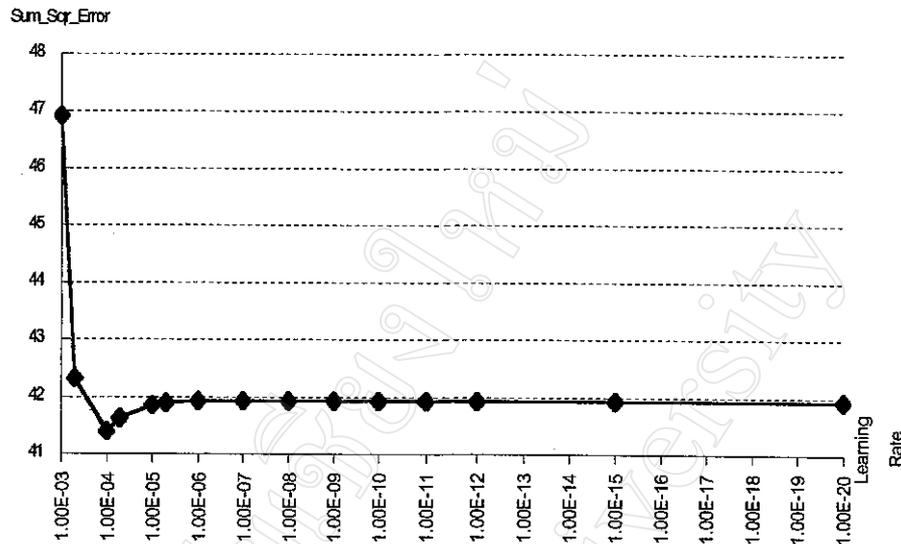
ระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการนี้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเป็นอุปกรณ์ชดเชย ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ ของ โครงข่ายประสาทเทียมที่สำคัญ เช่น อัตราการเรียนรู้ หรือจำนวนรอบในเรียนรู้ กับผลการทำงานของระบบควบคุม ดังนี้

4.1.4.1 ผลการทำงานของระบบควบคุมกับตัวแปรของโครงข่ายประสาทเทียม

ในการทดลองนี้ได้ปรับค่าอัตราส่วนของเรียนรู้ โดยที่ใช้ค่าเริ่มต้นค่าเดิมแล้วทำการเปรียบเทียบโดยอาศัยค่า rise time และค่าผลรวมกำลังสองของความผิดพลาด เป็นต้น ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.10 ผลของอัตราการเรียนรู้กับค่า rise time



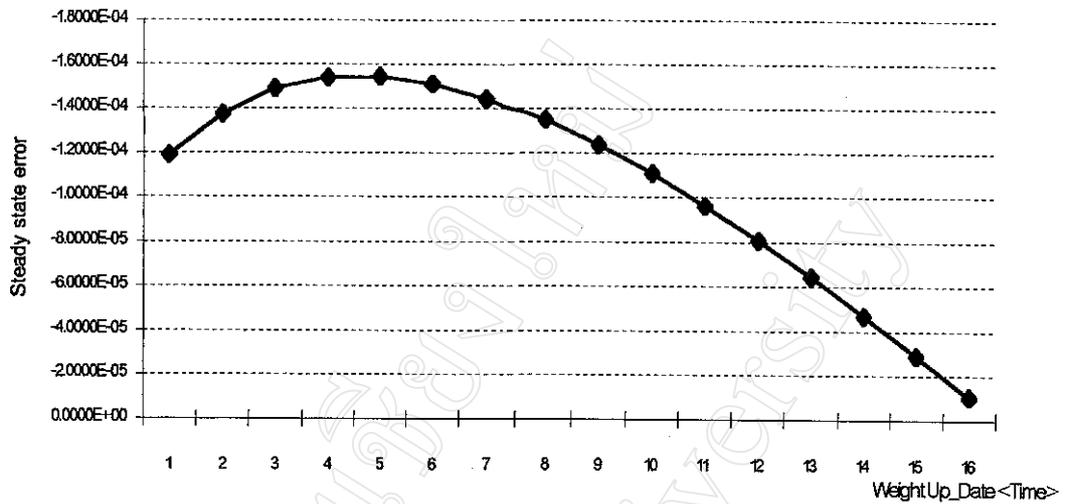
รูปที่ 4.11 ผลของอัตราการเรียนรู้กับค่าผลรวมกำลังสองของสัญญาณข้อผิดพลาด

จากรูปที่ 4.10 พบว่าในกรณีที่เพิ่มค่าอัตราการเรียนรู้จะทำให้ระบบมีการตอบสนองที่เร็ว แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 4.11 พบว่าในกรณีที่อัตราการเรียนรู้มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าผลรวมกำลังสองของสัญญาณข้อผิดพลาดที่สูงมากขึ้นด้วย จากผลการทดลองจึงเลือกใช้อัตราการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมเป็น 1×10^{-12} โดยโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทดลองมีขนาดดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในระบบควบคุม

โครงข่ายประสาทเทียม	จำนวนโหนดเข้า	จำนวนโหนดที่ชั้นซ่อน	จำนวนโหนดออก
1. ระบุส่วนดำเนินการ	2	10	1
2. ควบคุมส่วนดำเนินการ	3	25	1

เนื่องจากระบบควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยได้ออกแบบให้โครงข่ายมีการเรียนรู้ได้ตลอดเวลาจากสัญญาณข้อผิดพลาด จึงได้ทำการทดลองให้โครงข่ายประสาทเทียมทำการปรับค่าน้ำหนักโดยทำการควบคุมส่วนดำเนินการ 1 รอบ รอบละ 10 วินาที ที่อัตราการเรียนรู้เป็น 100 ครั้งต่อ 1วินาที อัตราการเรียนรู้เป็น 1×10^{-12} แล้วเก็บค่าน้ำหนักสุดท้ายไว้ เมื่อทำการทดลองรอบต่อไปก็ใช้ค่าน้ำหนักล่าสุดมาเป็นค่าเริ่มต้น ทำอย่างนี้เรื่อยไป จะได้ผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.12

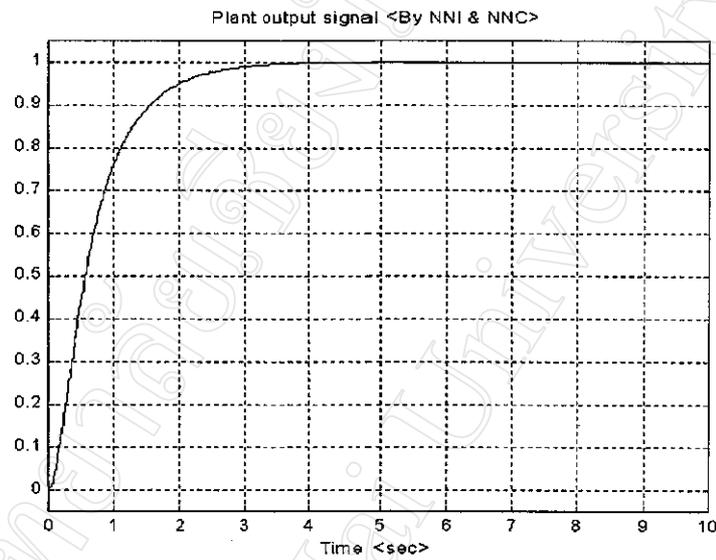


รูปที่ 4.12 ผลของสัญญาณข้อผิดพลาดสุดท้าย กับจำนวนครั้งที่เปลี่ยนค่าน้ำหนัก

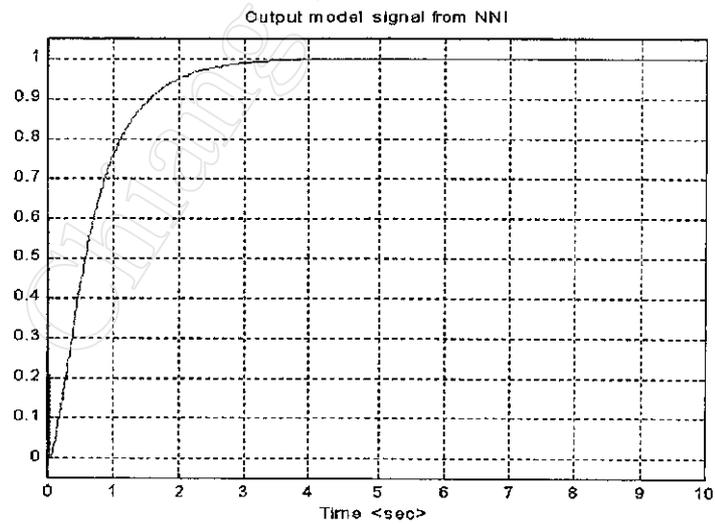
จากรูปที่ 4.12 พบว่าในกรณีที่จำนวนรอบของการปรับค่าน้ำหนักมากขึ้น จะทำให้ค่าสัญญาณผิดพลาดสุดท้ายมีค่าน้อยลง ซึ่งเมื่อใช้ค่าน้ำหนักนี้เป็นค่าน้ำหนักเริ่มต้นของ โครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 2 โครงข่าย ผลการควบคุมจะได้ผลการตอบสนองที่ดี

4.1.4.2 ผลการทำงานของระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

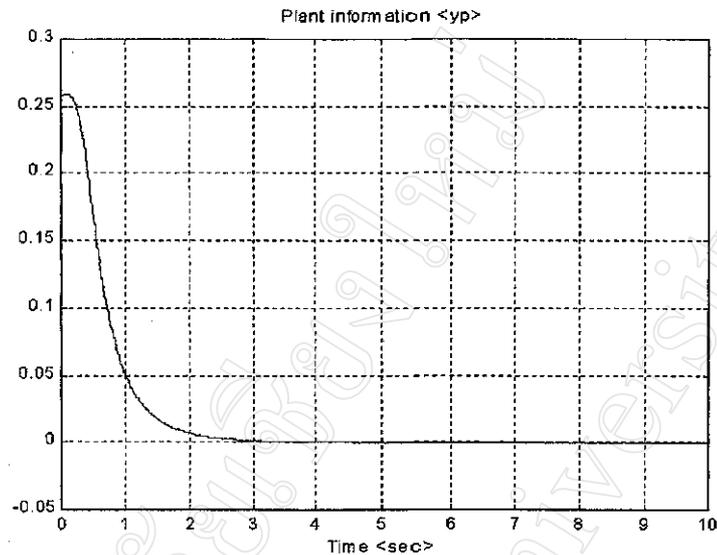
ผลการทำงานของระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.13 ผลการตอบสนองของส่วนดำเนินการ $y(t)$ ที่ได้จากระบบ



รูปที่ 4.14 สัญญาณที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ระบุส่วนดำเนินการ $y_m(t)$



รูปที่ 4.15 สัญญาณ Plant Information y_p ที่คำนวณได้จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ระบุส่วนดำเนินการ

สัญญาณที่แสดงในรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.15 ใช้ความถี่ในการสุ่มสัญญาณทั้งหมด 100 ครั้ง ในเวลา 1 วินาที อัตราการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ควบคุมส่วนดำเนินการเป็น 1×10^{-12} และสัญญาณอ้างอิงใช้เป็น unit step จากผลการทดลองที่ได้สามารถวิเคราะห์ผลการตอบสนองได้ดังนี้

ตารางที่ 4.7 ค่าดัชนีของส่วนดำเนินการที่ได้จากระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็น unit step

ดัชนี	ค่า
Steady state output	0.9999979318
Steady state error	2.068×10^{-6}
Rise time(ที่ 90%ของ ค่าเสถียร)	1.5532(วินาที)
Setting time	4.55(วินาที)
% Over shoot	ไม่มี

หมายเหตุ ค่า steady state error จะมีค่าเข้าสู่ศูนย์ยิ่งขึ้นถ้าปล่อยให้ระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการทำงานต่อไป

4.1.5 ผลการตอบสนองที่ได้จากส่วนดำเนินการที่ใช้ระบบควบคุมแบบต่าง ๆ

ผลการทดลองที่ได้จากระบบควบคุมแบบต่าง ๆ สำหรับส่วนดำเนินการนี้ สามารถแสดงได้ดังนี้

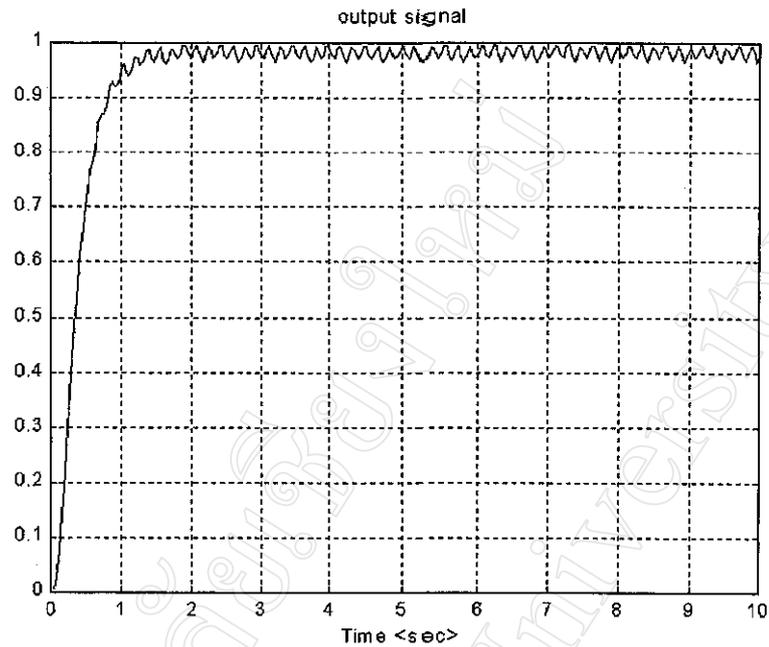
ตารางที่ 4.8 ค่าดัชนีที่ได้จากระบบควบคุมแบบต่าง ๆ

ดัชนี	ระบบควบคุม ที่นำเสนอ	ระบบควบคุมที่ใช้ อุปกรณ์ชดเชยแบบ PID	ระบบควบคุม อ้างอิง[22]
Steady state output	0.9999979318	1.00000005352253	0.9998
Steady state error	2.068×10^{-6}	5.352×10^{-8}	0.0002
Rise time	1.5532(วินาที)	0.128(วินาที)	0.475(วินาที)
Setting time	4.55(วินาที)	1.5(วินาที)	0.95(วินาที)
% Over shoot	ไม่มี	0.89642%	0.542%

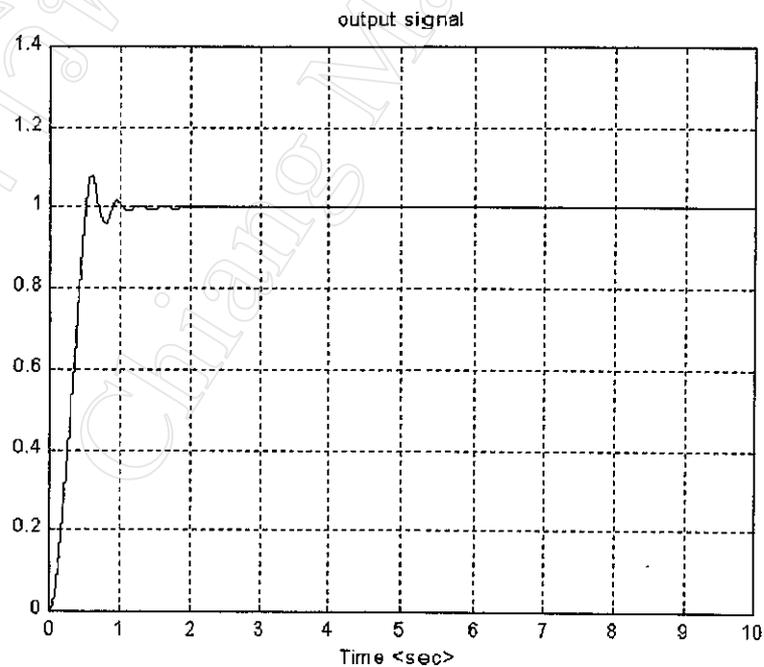
ผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4.8 เป็นผลการตอบสนองของส่วนดำเนินการเมื่อให้สัญญาณอ้างอิงเป็น unit step อัตราการสุ่มสัญญาณเป็น 100 ครั้งต่อ 1 วินาที

4.1.6 ผลการตอบสนองของระบบควบคุมกับอัตราการสุ่มสัญญาณ

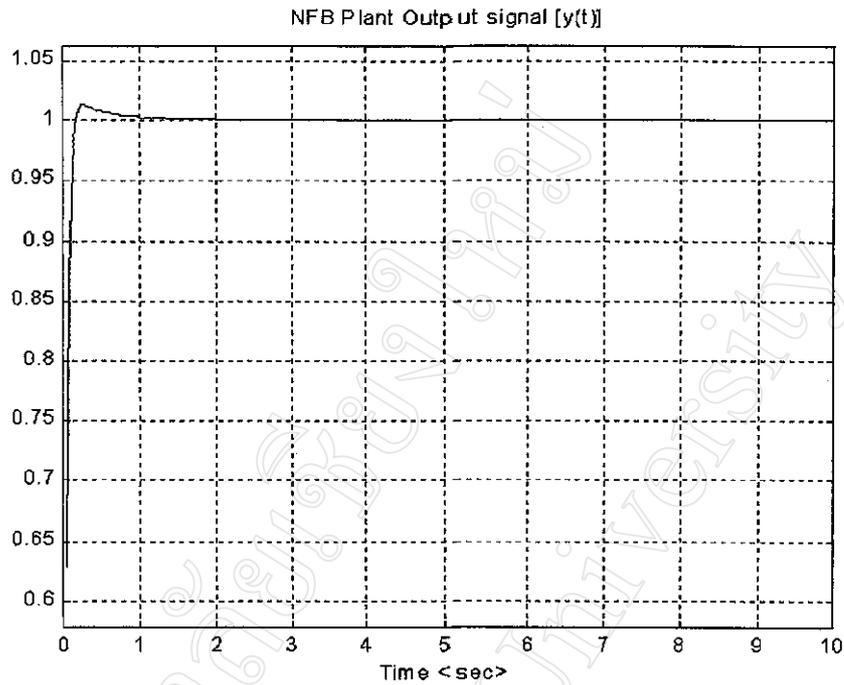
จากผลการทดลองที่ได้นำเสนอไปในหัวข้อข้างต้น ใช้อัตราการสุ่มสัญญาณเป็น 100 ครั้งต่อ 1 วินาที เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการสุ่มสัญญาณให้ลดลงเป็น 25 ครั้งต่อ 1 วินาที และเพิ่มขึ้นเป็น 1000 ครั้งต่อ 1 วินาที แล้วหาผลการตอบสนองที่ได้จากระบบควบคุมทั้ง 3 แบบ โดยใช้สัญญาณอ้างอิงเป็น unit step ได้ผลการทดลองดังนี้



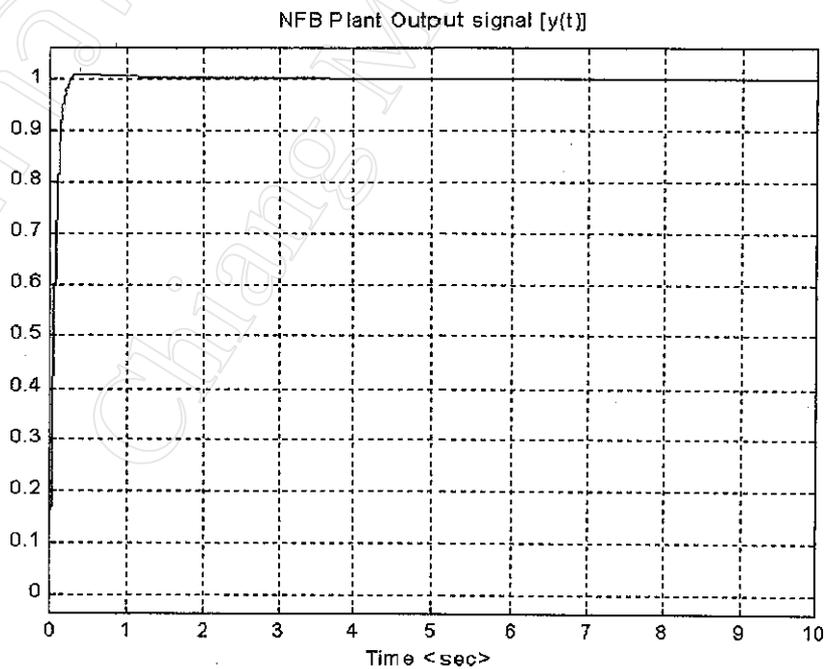
รูปที่ 4.16 สัญญาณขาออก $y(t)$ ที่ได้จากระบบควบคุมที่ใช้อ้างอิง [22] ที่อัตราการสุ่มสัญญาณเป็น 25 ครั้งต่อ 1 วินาที



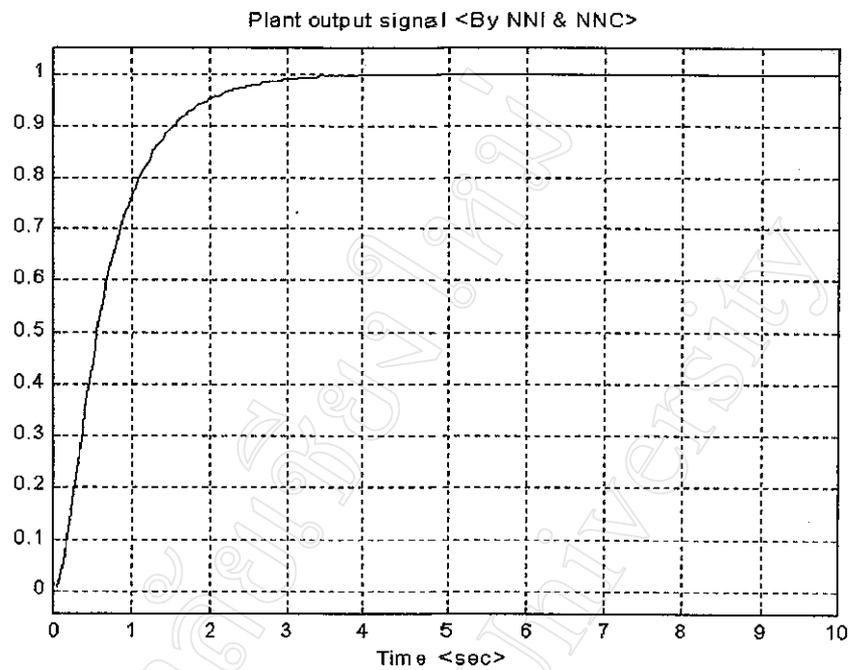
รูปที่ 4.17 สัญญาณขาออก $y(t)$ ที่ได้จากระบบควบคุมที่ใช้อ้างอิง [22] ที่อัตราการสุ่มสัญญาณเป็น 1000 ครั้งต่อ 1 วินาที



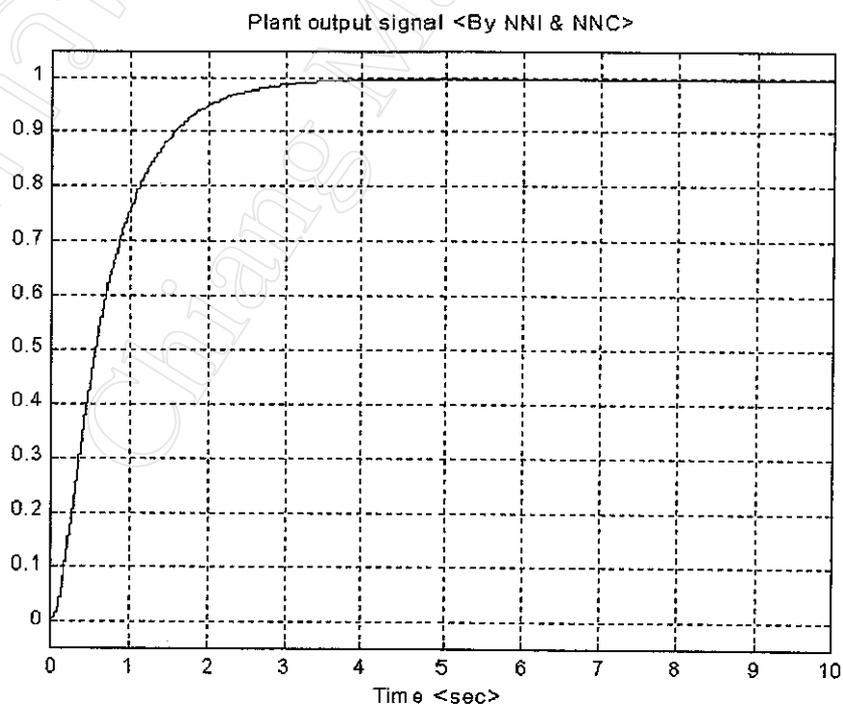
รูปที่ 4.18 สัญญาณขาออก $y(t)$ ที่ได้จากระบบควบคุมที่ใช้ PID เป็นอุปกรณ์ชดเชย ที่อัตราการสุ่ม สัญญาณเป็น 25 ครั้งต่อ 1 วินาที



รูปที่ 4.19 สัญญาณขาออก $y(t)$ ที่ได้จากระบบควบคุมที่ใช้ PID เป็นอุปกรณ์ชดเชย ที่อัตราการสุ่ม สัญญาณเป็น 1000 ครั้งต่อ 1 วินาที



รูปที่ 4.20 สัญญาณขาออก $y(t)$ ที่ได้จากระบบควบคุมที่นำเสนอ ที่อัตราการสุ่มสัญญาณเป็น 25 ครั้งต่อ 1 วินาที



รูปที่ 4.21 สัญญาณขาออก $y(t)$ ที่ได้จากระบบควบคุมที่นำเสนอ ที่อัตราการสุ่มสัญญาณเป็น 1000 ครั้งต่อ 1 วินาที

4.2 ผลการทดลองที่ได้ส่วนดำเนินการที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 1

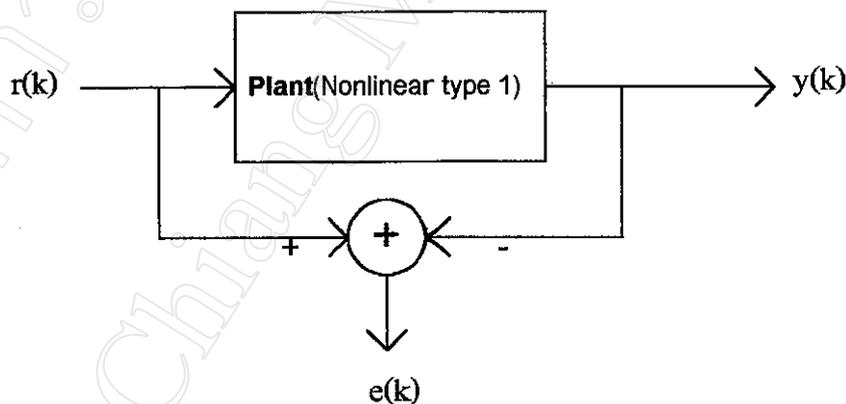
จากผลการทดลองจากหัวข้อ 4.1 เป็นการใช้ระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการสำหรับส่วนดำเนินการที่เป็นเชิงเส้น ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงการนำเอาระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการมาใช้งานกับส่วนดำเนินการที่มีคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยส่วนดำเนินการนี้นำมาจากเอกสารทางวิชาการของที่กล่าวถึงการควบคุมและระบุส่วนดำเนินการที่ไม่เป็นเชิงเส้น[15] โดยมีความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$y(k+1) = \frac{y(k)y(k-1)[y(k)+2.5]}{1+y^2(k)+y^2(k-1)} + u(k) \quad (3)$$

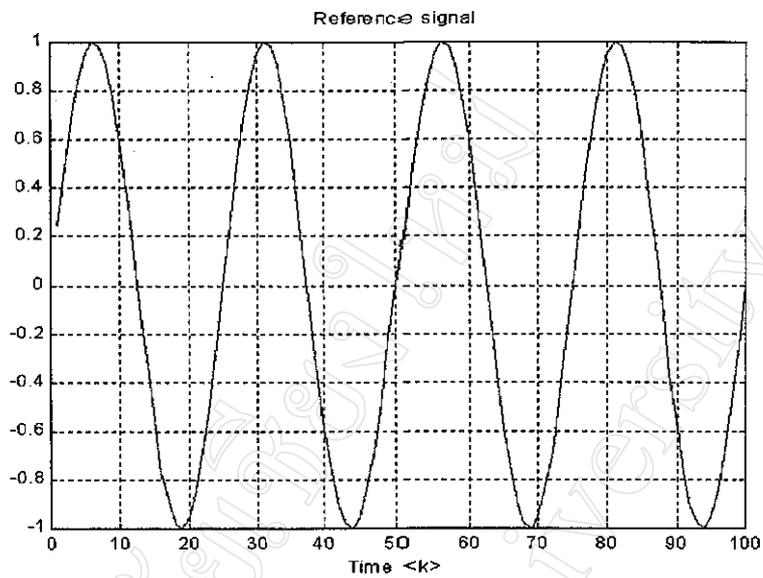
เมื่อ $u(k)$ เป็นสัญญาณขาเข้าของส่วนดำเนินการ และ $y(k)$ เป็นสัญญาณขาออกที่ได้จากส่วนดำเนินการ

4.2.1 คุณลักษณะของส่วนดำเนินการ

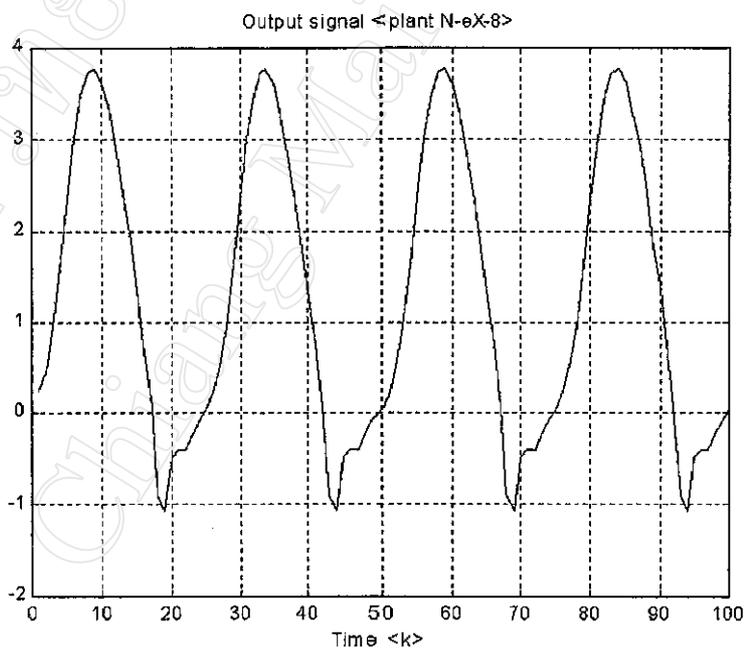
ในกรณีที่ระบบควบคุมไม่มีอุปกรณ์ชดเชย โดยมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.22 และกำหนดให้สัญญาณอ้างอิง เป็น $r(k) = \sin(2\pi k/25)$ ตามรูปที่ 4.23 จะได้ผลการตอบสนองจากส่วนดำเนินการออกมามีดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.22 ระบบควบคุมสำหรับส่วนดำเนินการที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 1 เมื่อไม่มีอุปกรณ์ชดเชย



รูปที่ 4.23 สัญญาณอ้างอิง $r(k)$



รูปที่ 4.24 สัญญาณขาออกจากส่วนดำเนินการ $y(k)$ ในกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์ชดเชย

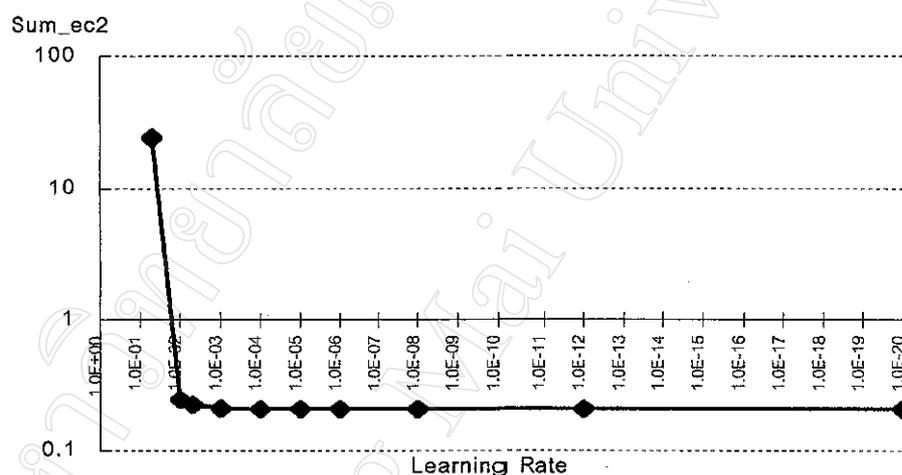
ผลการตอบสนองของส่วนดำเนินการที่ได้ จะเห็นว่ามีความแตกต่างจากสัญญาณอ้างอิงที่ป้อนเข้าส่วนดำเนินการมาก และเมื่อทดลองต่อไปอีก(เพิ่มเวลาการคำนวณ k) พบว่า

สัญญาณขาออกที่ได้จากส่วนดำเนินการยังคงมีความแตกต่างจากสัญญาณอ้างอิง เหมือนกับ
สัญญาณขาออกที่เวลาเริ่มต้น

4.2.2 ค่าอัตราการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมกับการทำงานของระบบ

เพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในระบบควบคุม ก็ได้ทำการทดลองปรับค่าอัตราการเรียนรู้แล้วคำนวณหาค่าผลรวมความผิดพลาด

ของระบบควบคุมยกกำลังสอง $\left(\sum_{k=1}^{k_{\max}} (r(k) - y(k))^2 \right)$ ผลการทดลองแสดงได้ในรูปที่ 4.25

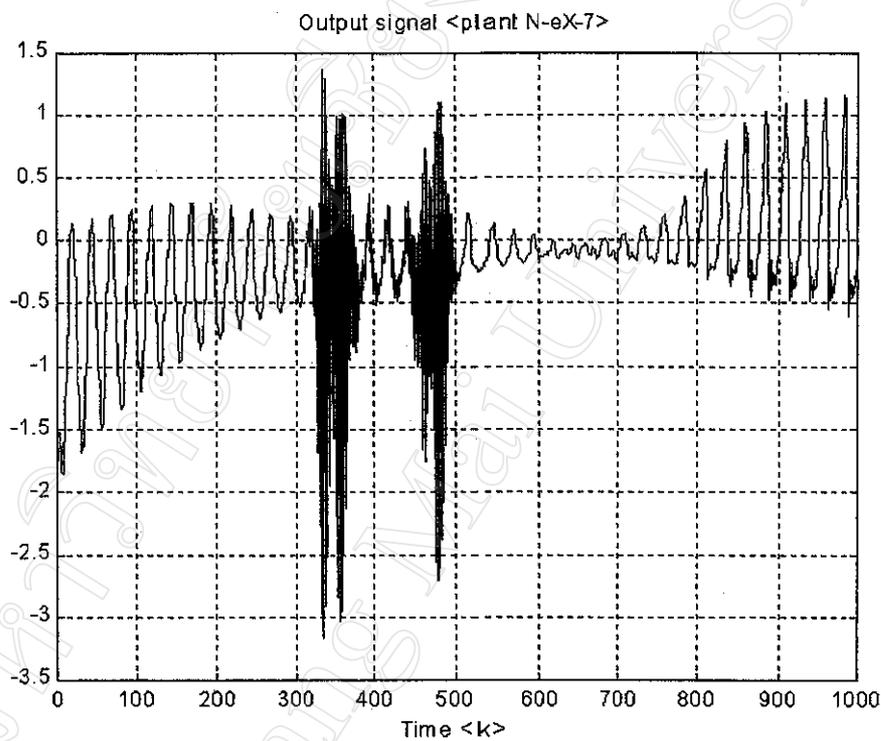


รูปที่ 4.25 ผลของอัตราการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมกับผลรวมความผิดพลาดของระบบ
ควบคุมยกกำลังสอง

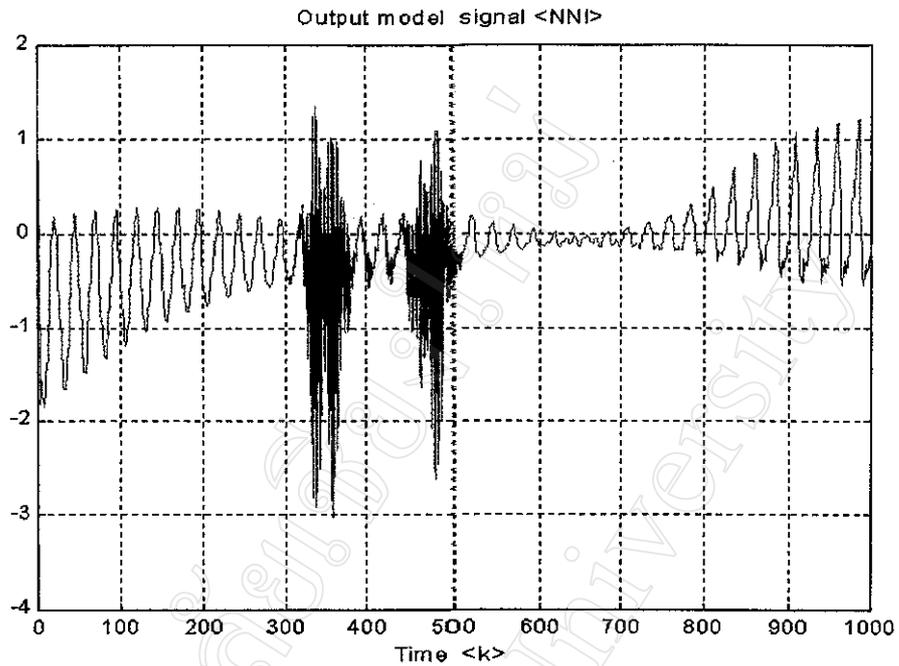
จากผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าผลรวมความผิดพลาดของระบบควบคุมยกกำลังสองจะลดลงและเริ่มคงที่ที่ค่าอัตราการเรียนรู้ประมาณ 0.001 ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าอัตราการเรียนรู้สำหรับโครงข่ายประสาทเทียม

4.2.3 ผลที่ได้จากระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการในกรณีเรียนรู้ครั้งแรก

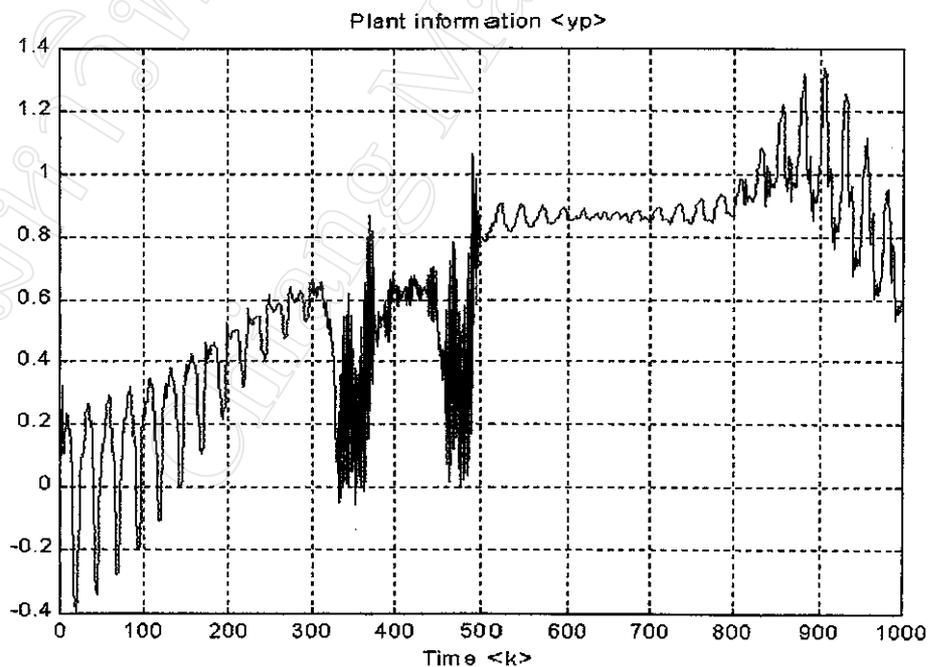
เมื่อนำระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการมาใช้งานกับส่วนดำเนินการที่ไม่เป็นเชิงเส้นนี้ ในการทดลองครั้งแรกใช้จำนวนครั้งในจำนวนทั้งหมด 5000 ครั้ง ($k=1$ ถึง 5000) ในอัตราการเรียนรู้ เป็น 0.001 ให้จำนวนรอบสูงสุดของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ระบุส่วนดำเนินการเป็น 20 รอบ ต่อการคำนวณ 1 ครั้ง ซึ่งจะได้ผลการทดลองออกมาดังนี้



รูปที่ 4. 26 สัญญาณขาออกที่ได้จากระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการ $y(k)$ ในกรณีที่เป็นการเรียนรู้ครั้งแรกของโครงข่ายประสาทเทียม ที่ เวลา $k=0$ ถึง 1000

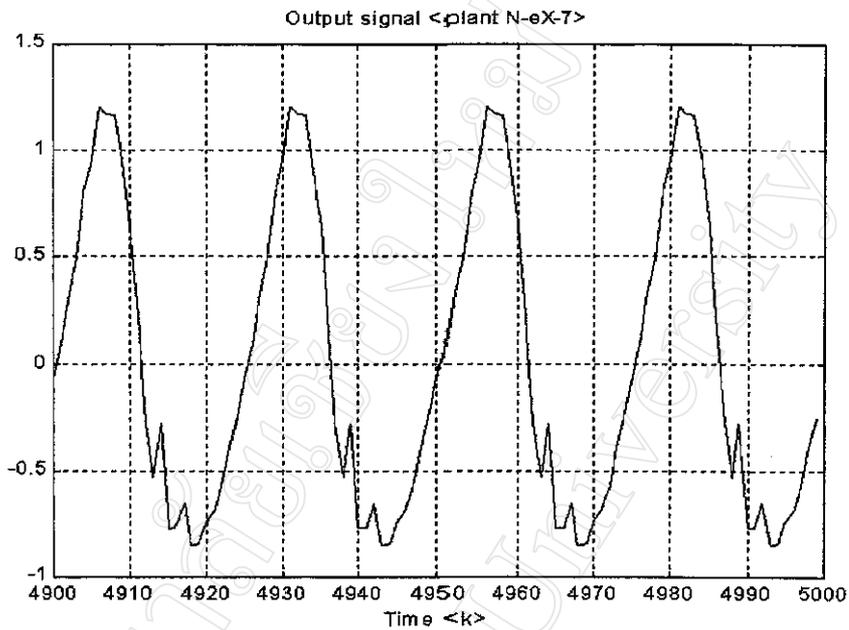


รูปที่ 4.27 สัญญาณขาออกที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ระบุส่วนดำเนินการ $y_m(k)$ ในกรณีที่เป็นการเรียนรู้ครั้งแรกของโครงข่ายประสาทเทียม ที่เวลา $k=0$ ถึง 1000

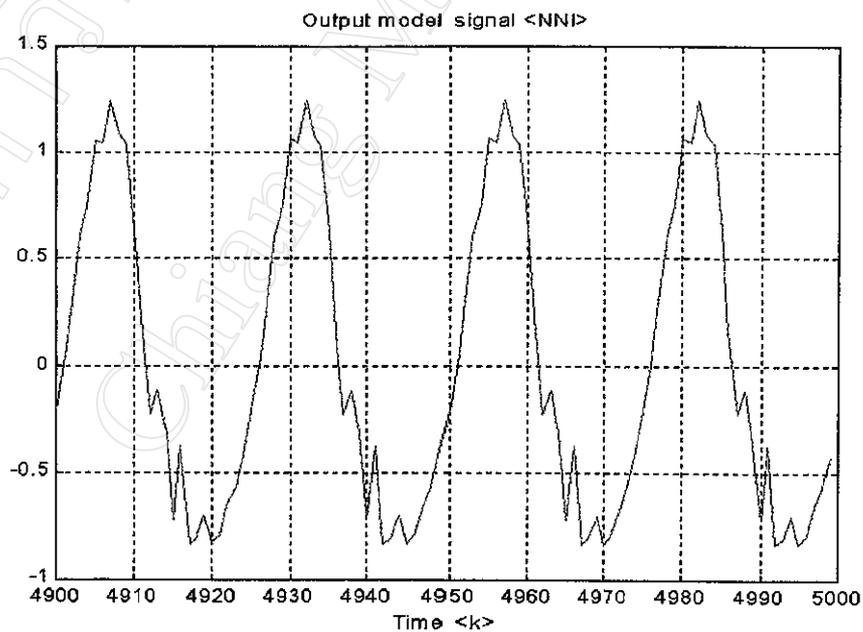


รูปที่ 4.28 สัญญาณ Plant information ที่คำนวณได้ในการเรียนรู้ครั้งแรกของโครงข่ายประสาทเทียม ที่ เวลา $k=0$ ถึง 1000

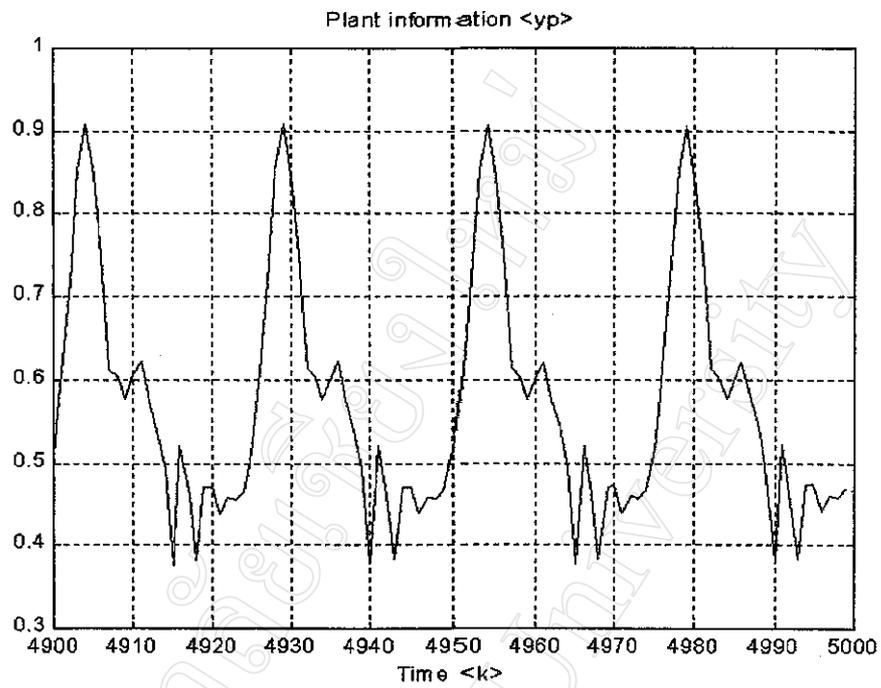
จากนั้นได้ทำการทดลองต่อไปอีกจนถึง $k=5000$ ได้ผลการทดลองออกมาดังนี้



รูปที่ 4.29 สัญญาณขาออกที่ได้จากระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการ $y(k)$ ในกรณีที่เป็นกรเรียนรู้ครั้งแรกของโครงข่ายประสาทเทียม ที่ เวลา $k=4900$ ถึง 5000



รูปที่ 4.30 สัญญาณขาออกที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ระบุส่วนดำเนินการ $y_m(k)$ ในกรณีที่เป็นกรเรียนรู้ครั้งแรกของโครงข่ายประสาทเทียม ที่ เวลา $k=4900$ ถึง 5000

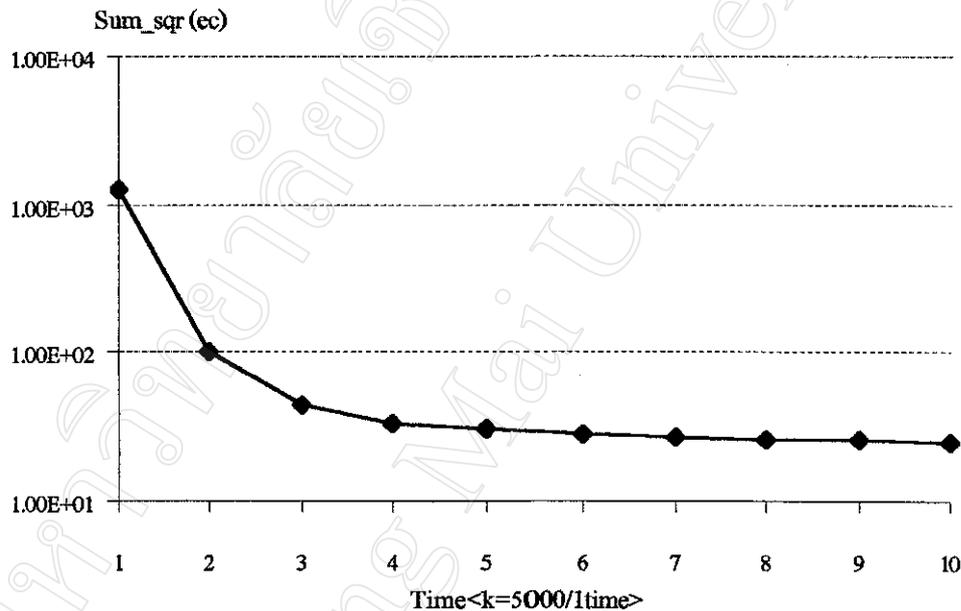


รูปที่ 4.31 สัญญาณ Plant information ที่คำนวณได้ในกรณีของการเรียนรู้ครั้งแรกที่ เวลา $k=4900$ ถึง 5000

จากผลการทดลองที่ได้พบว่าในช่วงเริ่มต้นการทำงานของระบบสัญญาณขาออกที่ได้จากส่วนดำเนินการจะผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณอ้างอิงมาก (ตั้งแต่ $k=1$ ถึง $k=1000$) หลังจากนั้นสัญญาณขาออกที่ได้จะมีลักษณะที่ค่อนข้างเหมือนกับสัญญาณอ้างอิงมากขึ้น

4.2.4 ผลที่ได้จากระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการในกรณีที่ผ่านมาแล้ว

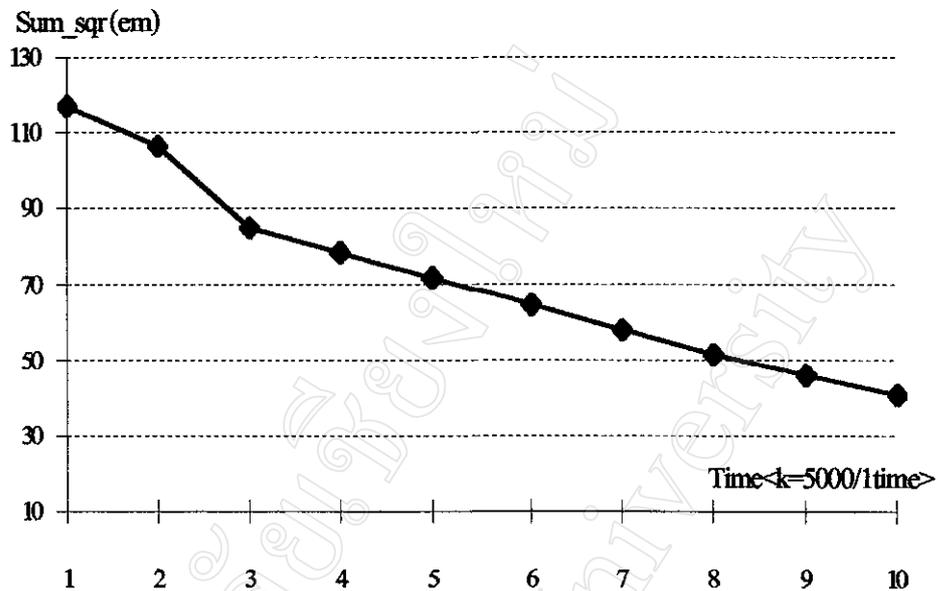
จากผลการทดลองที่ได้ในหัวข้อข้างต้น พบว่าเมื่อได้ให้ระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการทำงาน ณ เวลาที่นานขึ้น (โครงข่ายประสาทเทียมได้รับการเรียนรู้มากขึ้น) จะทำให้ได้ผลการตอบสนองที่ใกล้เคียงกับสัญญาณอ้างอิงมากที่สุด ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองโดยให้ระบบทำงานซ้ำกันหลาย ๆ รอบโดยแต่ละรอบให้ค่า k มากที่สุดเป็น 5000 และทุกรอบของการทำงานโครงข่ายประสาทเทียมได้รับการปรับค่าน้ำหนักอย่างต่อเนื่อง ที่อัตราการเรียนรู้เป็น 0.001 ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.32 ผลรวมกำลังสองของสัญญาณข้อผิดพลาดของสัญญาณขาออกกับสัญญาณอ้างอิง ในส่วนดำเนินการที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 1 ณ รอบการทำงานที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.32 เมื่อให้ Sum_sqr(ec) เป็น $\left(\sum_{k=1}^{k_{\max}} (r(k) - y(k))^2 \right)$ หรือ ค่าผลรวม

ความผิดพลาดของระบบควบคุมยกกำลังสอง พบว่ามีค่าลดลงเมื่อจำนวนรอบการทำงานของระบบมากขึ้น

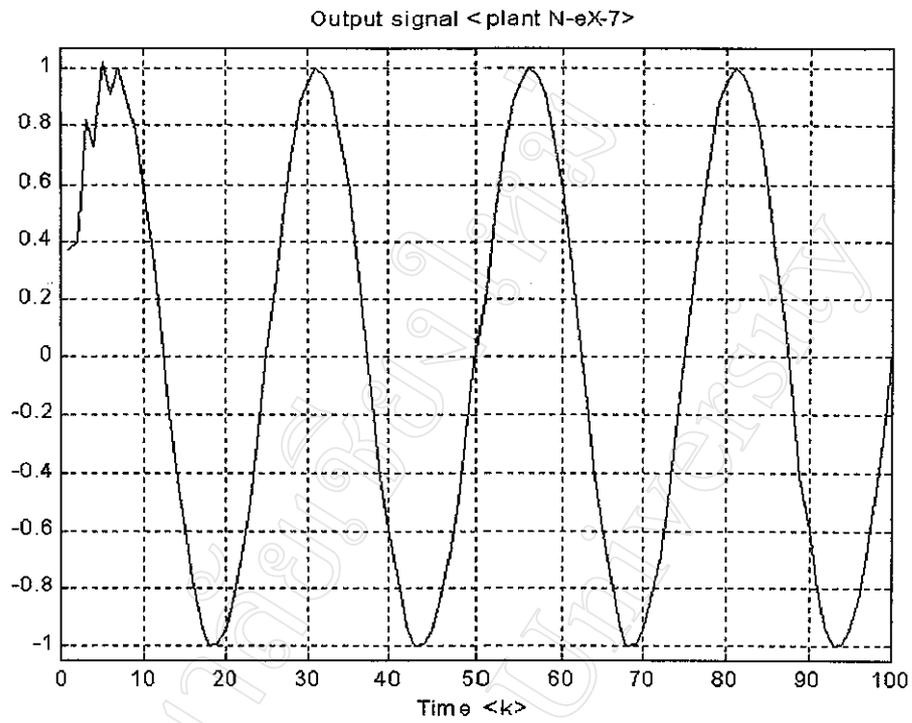


รูปที่ 4.33 ผลรวมกำลังสองของสัญญาณข้อผิดพลาดของสัญญาณขาออกกับสัญญาณขาออกที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ระบุส่วนดำเนินการ ในส่วนดำเนินการที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 1 เมื่อรอบการทำงานเพิ่มขึ้น

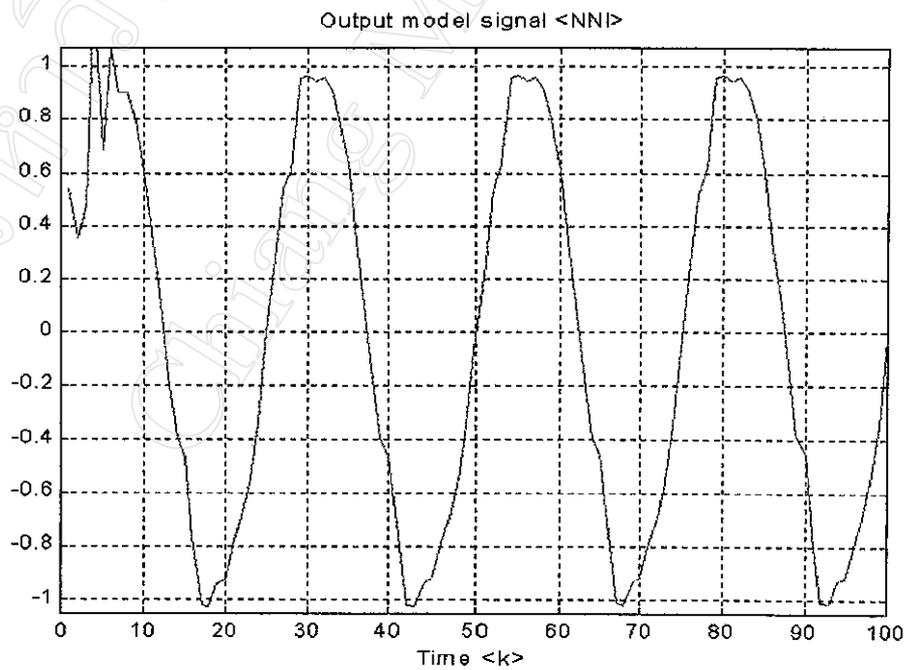
จากรูปที่ 4.33 เมื่อให้ Sum_sqr(em) เป็น $\left(\sum_{k=1}^{k_{\max}} (y(k) - y_m(k))^2 \right)$ หรือ ค่าผล

รวมความผิดพลาดของสัญญาณขาออกกับสัญญาณขาออกที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ระบุส่วนดำเนินการ พบว่ามีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อจำนวนรอบการทำงานของระบบมากขึ้นเช่นเดียวกับค่าผลรวมความผิดพลาดของระบบควบคุมยกกำลังสอง

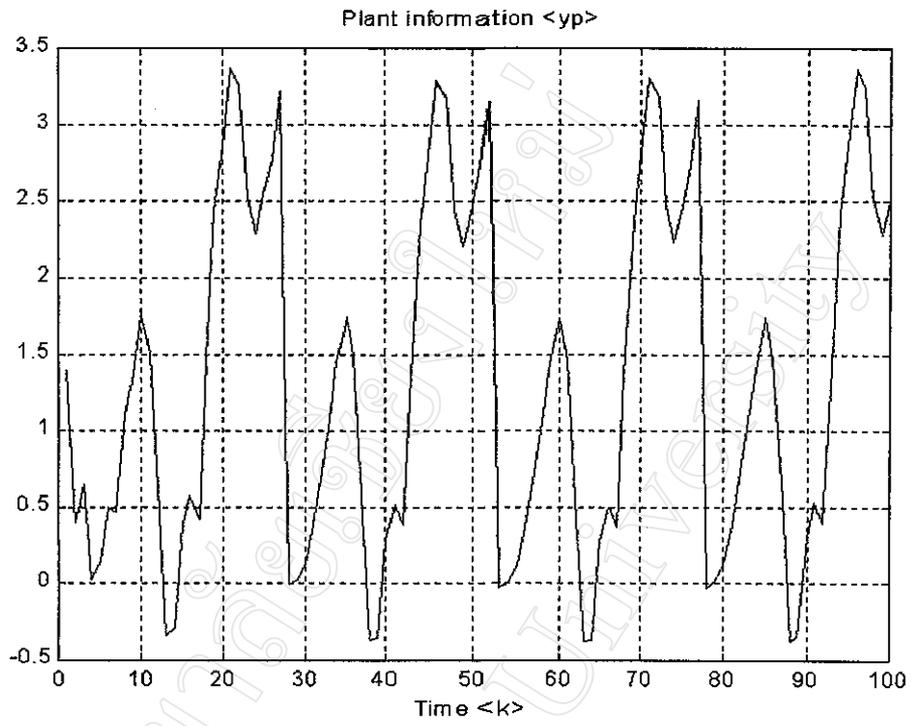
เมื่อโครงข่ายประสาทเทียมของระบบได้รับการปรับค่าน้ำหนักจากจำนวนรอบของการทำงานที่มากพอแล้ว ผลการตอบสนองที่ได้สามารถแสดงได้ดังนี้



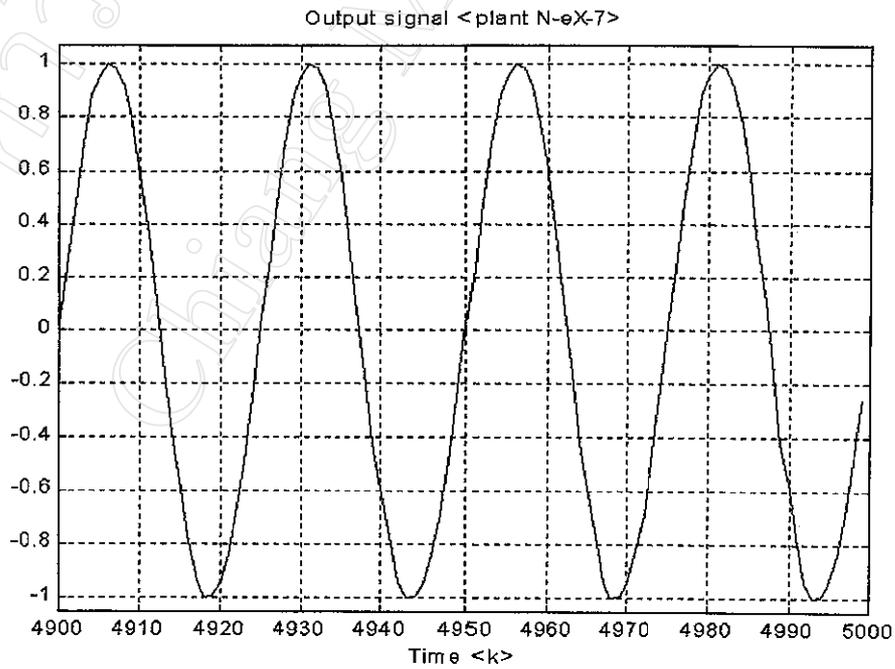
รูปที่ 4.34 สัญญาณขาออก $y(k)$ ที่ $k=1$ ถึง 100



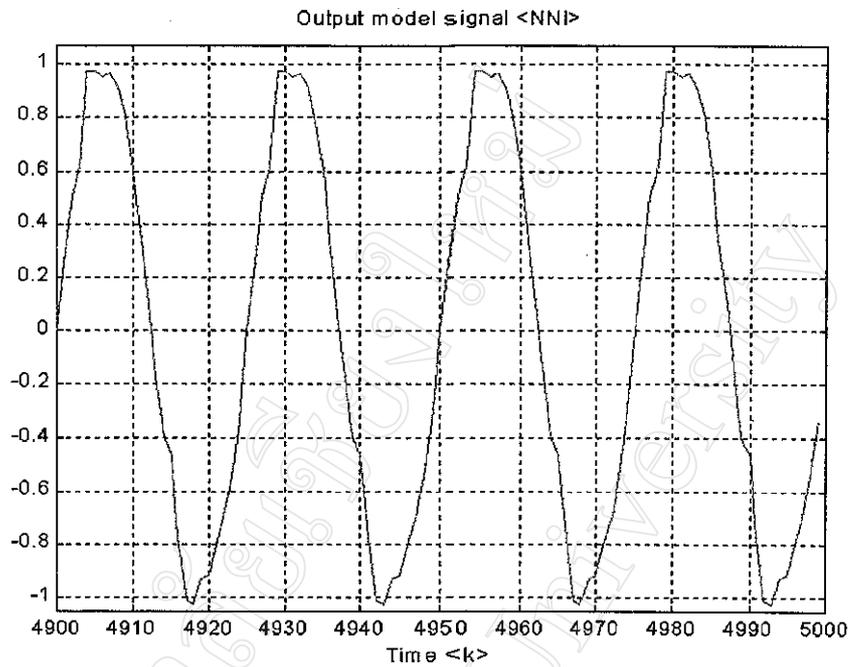
รูปที่ 4.35 สัญญาณจากโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ระบุส่วนดำเนินการ $y_m(k)$ ที่ $k=1$ ถึง 100



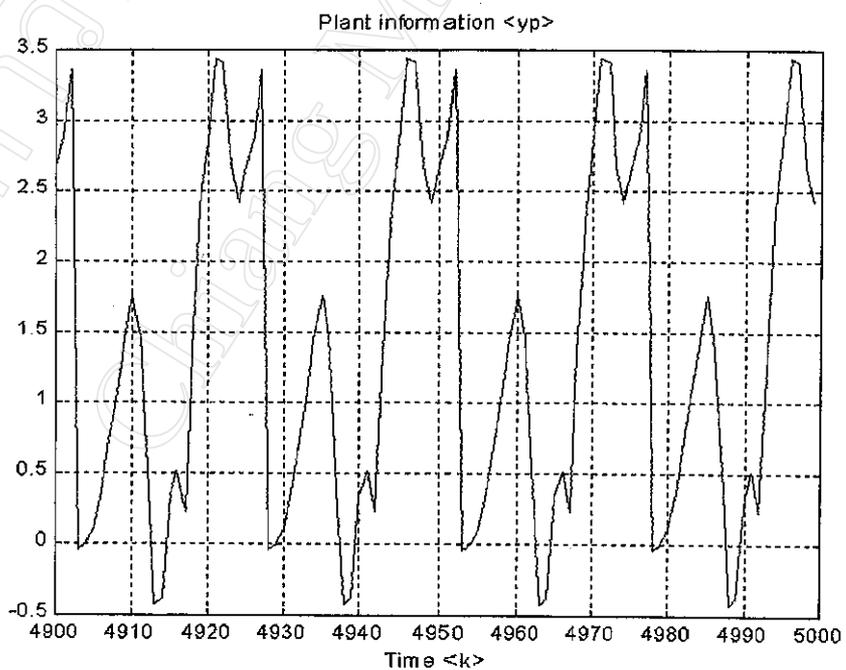
รูปที่ 4.36 สัญญาณ Plant information ที่ เวลา $k=1$ ถึง 100



รูปที่ 4.37 สัญญาณขาออก $y(k)$ ที่ $k=4900$ ถึง 5000



รูปที่ 4.38 สัญญาณจากโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ระบุส่วนดำเนินการ $y_m(k)$ ที่ $k=4900$ ถึง 5000



รูปที่ 4.39 สัญญาณ Plant information ที่ เวลา $k=4900$ ถึง 5000

4.3 ผลการทดลองที่ได้ส่วนดำเนินการที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 2

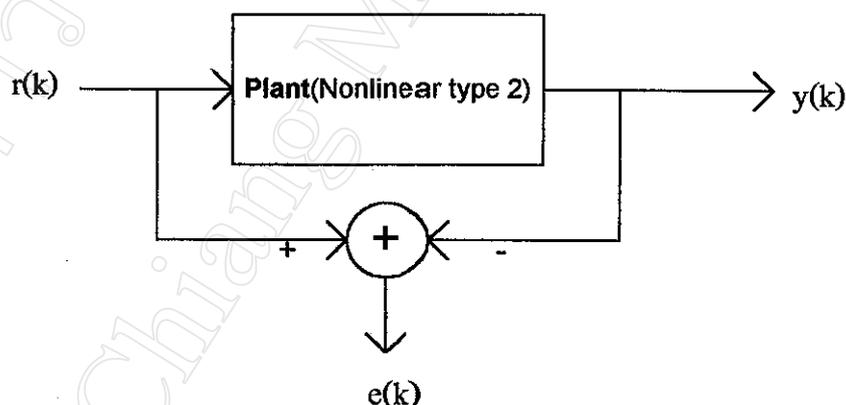
ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงการนำเอาระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการมาใช้งานกับส่วนดำเนินการที่มีคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นอีกส่วนดำเนินการหนึ่ง โดยส่วนดำเนินการนี้ก็นำมาจากเอกสารทางวิชาการที่กล่าวถึงระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการที่ไม่เป็นเชิงเส้น[15] เช่นกัน โดยมีความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$y(k+1) = \frac{y(k)}{1+y^2(k)} + u^3(k) \quad (4)$$

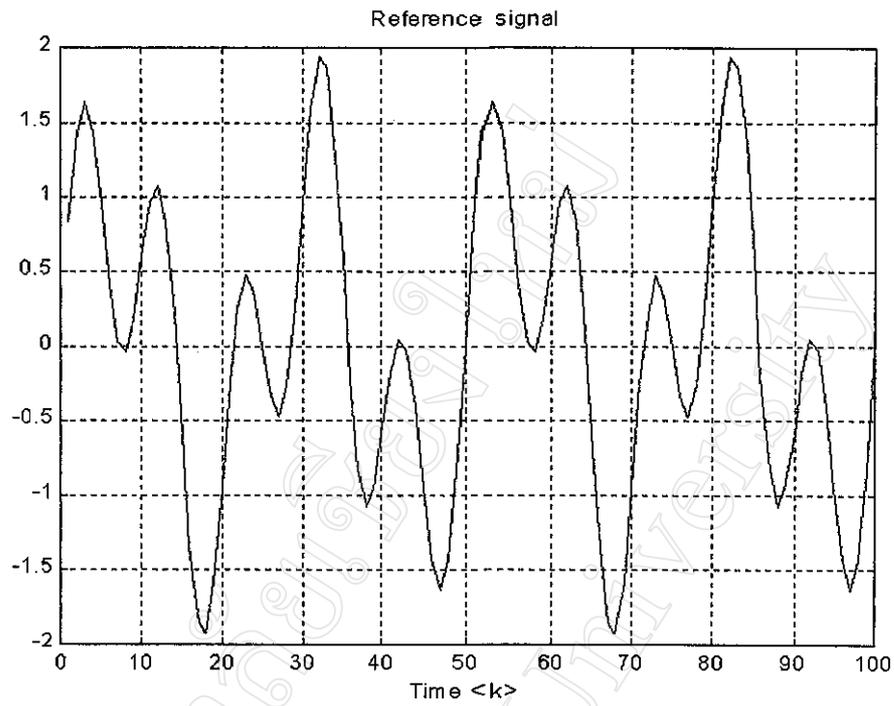
เมื่อ $u(k)$ เป็นสัญญาณขาเข้าของส่วนดำเนินการ และ $y(k)$ เป็นสัญญาณขาออกที่ได้จากส่วนดำเนินการ

4.3.1 คุณลักษณะของส่วนดำเนินการ

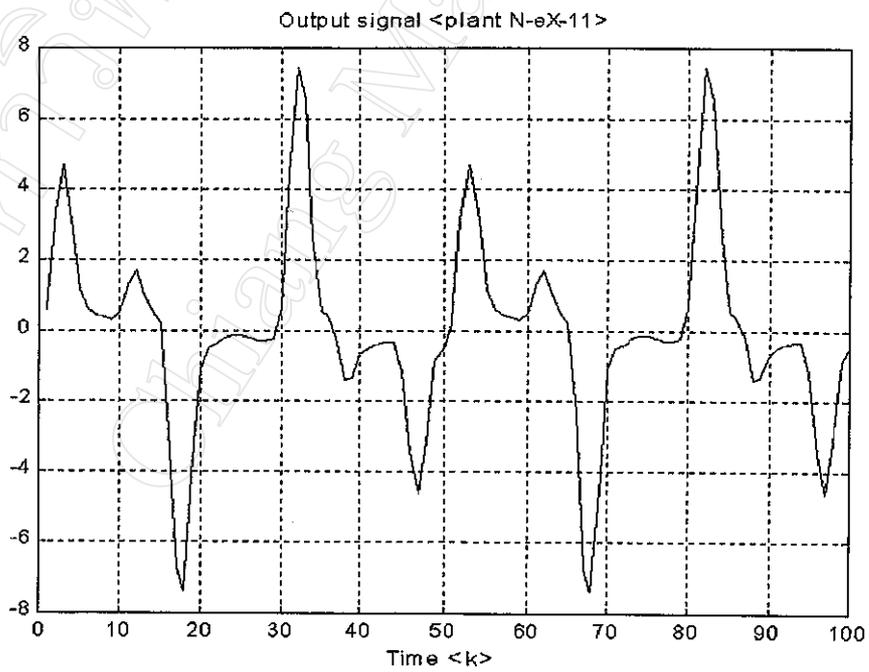
ในกรณีที่ระบบควบคุมไม่มีอุปกรณ์ชดเชย โดยมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.40 และเมื่อกำหนดให้สัญญาณอ้างอิง เป็น $r(k) = \sin(2\pi k/25) + \sin(2\pi k/10)$ ตามรูปที่ 4.41 จะได้ผลการตอบสนองออกมามักรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.40 ระบบควบคุมสำหรับส่วนดำเนินการที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 2 เมื่อไม่มีอุปกรณ์ชดเชย



รูปที่ 4.41 สัญญาณอ้างอิง $r(k)$

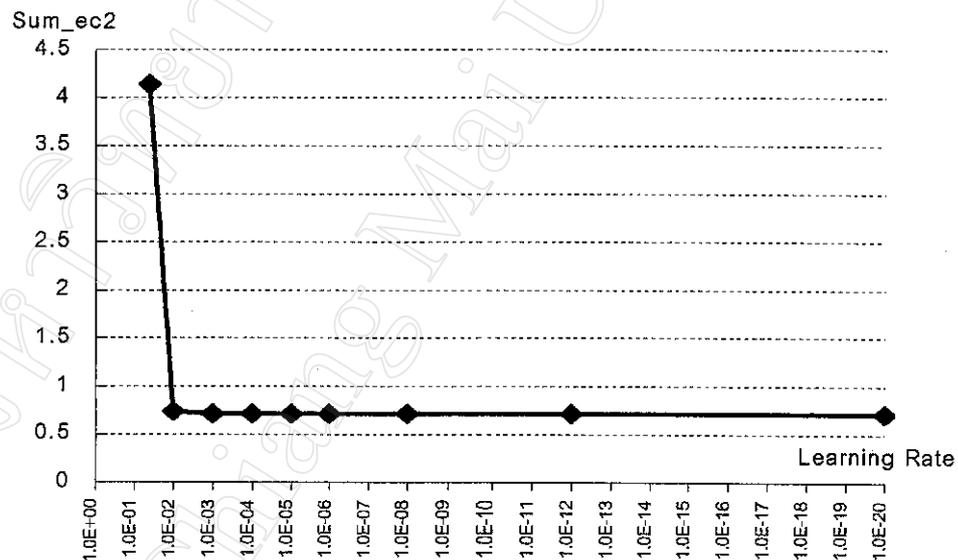


รูปที่ 4.42 สัญญาณขาออกจากส่วน $y(k)$ ดำเนินการในกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์ชดเชย

ผลการตอบสนองของส่วนดำเนินการที่ได้ จะเห็นว่ามีแตกต่างจากสัญญาณอ้างอิงที่ป้อนเข้าส่วนดำเนินการมาก และเมื่อทดลองต่อไปอีก(เพิ่มเวลาการคำนวณ) พบว่าสัญญาณขาออกที่ได้จากส่วนดำเนินการยังคงมีความแตกต่างจากสัญญาณอ้างอิง เหมือนกับสัญญาณขาออกที่เวลาเริ่มต้น ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับผลการทดลองในส่วนดำเนินการแบบที่ 1

4.3.2 ค่าอัตราการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมกับการทำงานของระบบ

เพื่อหาค่าอัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในระบบควบคุม ได้ทำการทดลองปรับค่าอัตราการเรียนรู้แล้วคำนวณหาค่าผลรวมความผิดพลาดของระบบควบคุมยกกำลังสอง $\left(\sum_{k=1}^{k_{\max}} (r(k) - y(k))^2 \right)$ เหมือนกับที่ทำในส่วนดำเนินการแบบที่ 1 ผลการทดลองแสดงได้ในรูปที่ 4.43

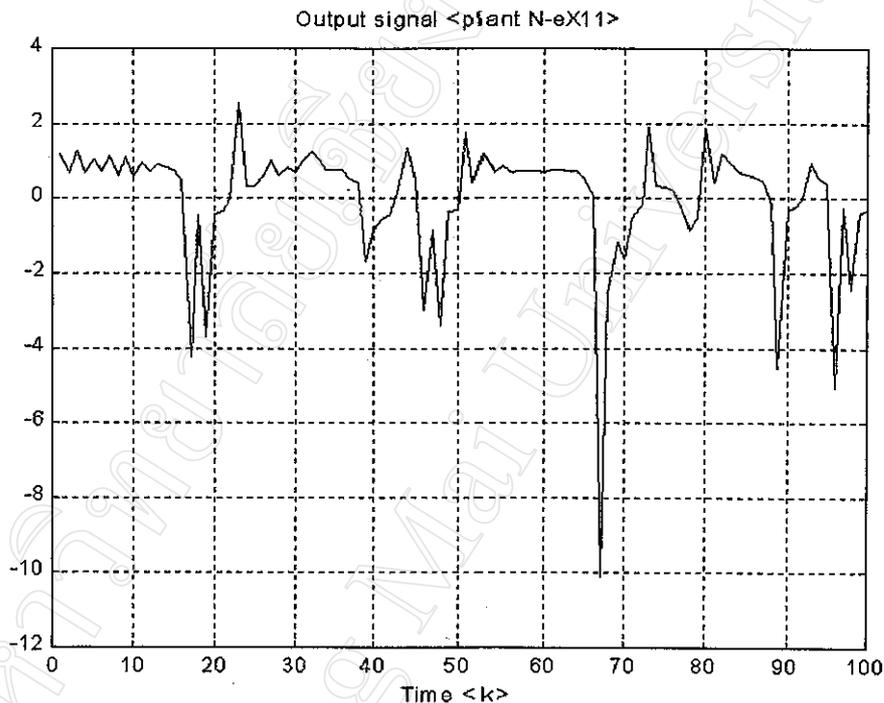


รูปที่ 4.43 ผลของอัตราการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมกับผลรวมความผิดพลาดของระบบควบคุมยกกำลังสอง

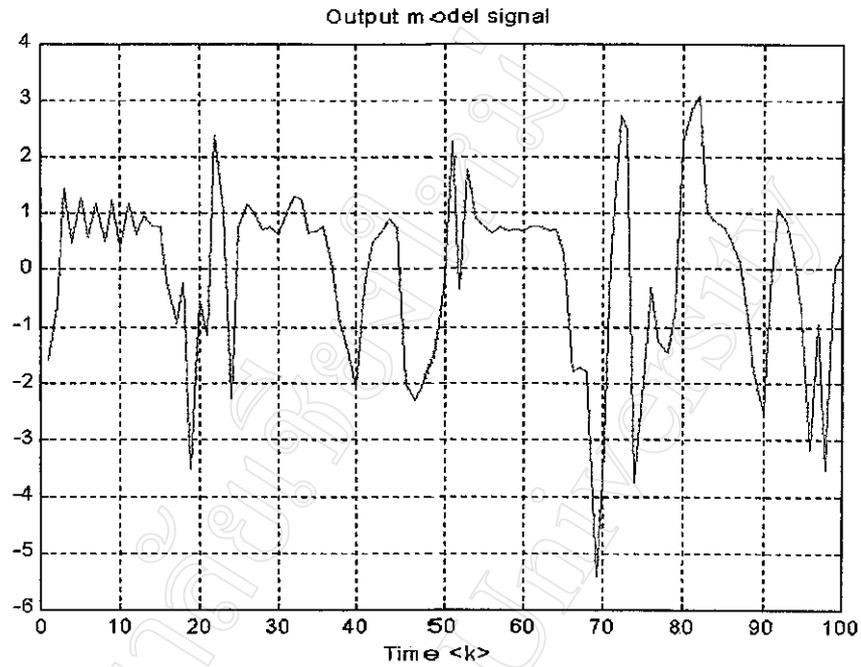
จากผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าผลรวมความผิดพลาดของระบบควบคุมยกกำลังสองจะลดลงและเริ่มคงที่ที่ค่าอัตราการเรียนรู้ประมาณ 0.01-0.001 ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราการเรียนรู้เป็น 0.001 และเพื่อให้สอดคล้องกับค่าอัตราการเรียนรู้ที่เลือกใช้ในส่วนดำเนินการแบบที่ 1 ด้วย

4.3.3 ผลที่ได้จากระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการในกรณีเรียนรู้ครั้งแรก

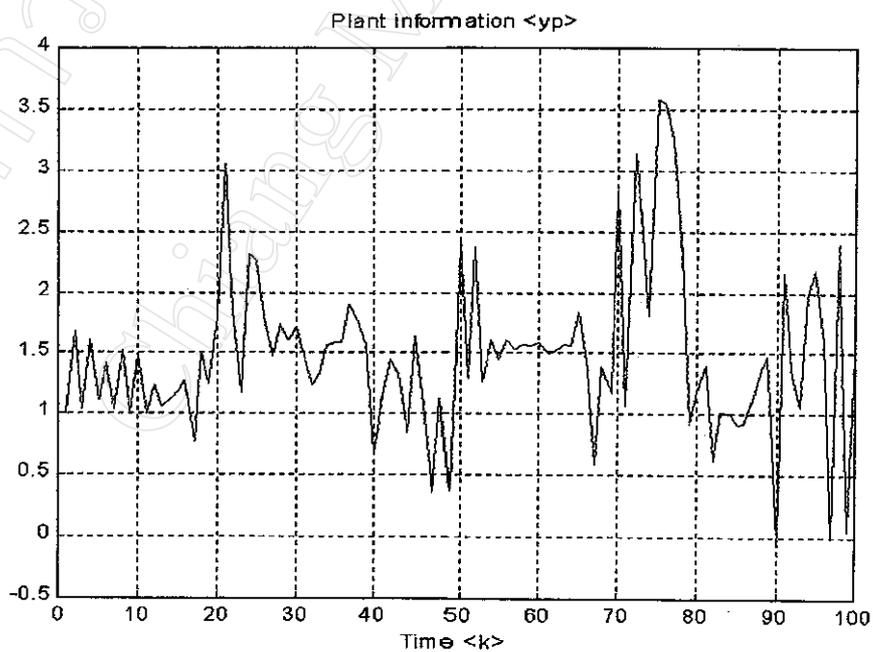
เมื่อนำระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการมาใช้งานกับส่วนดำเนินการที่ไม่เป็นเชิงเส้นนี้ ในการทดลองครั้งแรกใช้จำนวนครั้งในค่านวมทั้งหมด 5000 ครั้ง ($k=1$ ถึง 5000) ในอัตราการเรียนรู้เป็น 0.001 ให้จำนวนรอบสูงสุดของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ระบุส่วนดำเนินการเป็น 50 รอบ ต่อการคำนวณ 1 ครั้ง ซึ่งจะได้ผลการทดลองออกมาดังนี้



รูปที่ 4.44 สัญญาณขาออกที่ได้จากส่วนดำเนินการ $y(k)$ ในกรณีที่เป็นการเรียนรู้ครั้งแรกของโครงข่ายประสาทเทียม ที่ $k=1$ ถึง 100

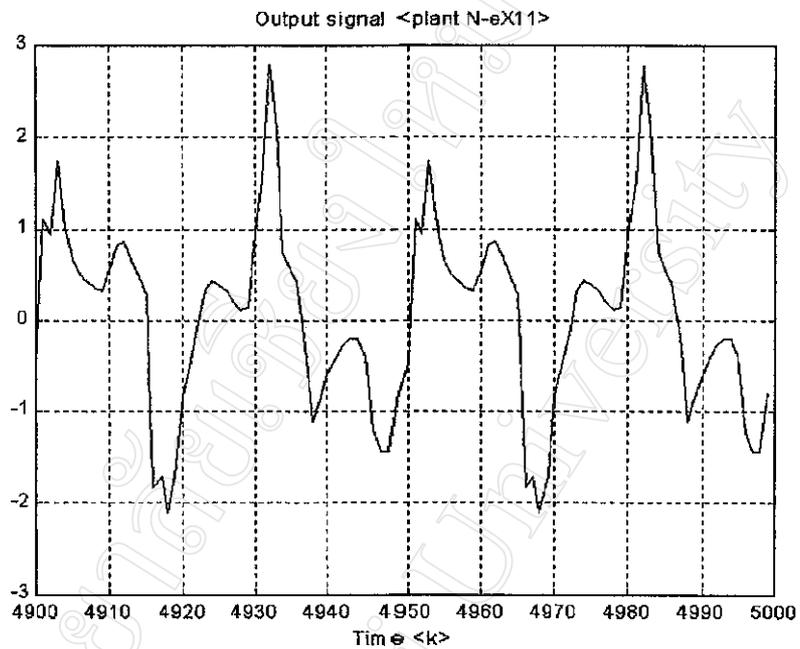


รูปที่ 4.45 สัญญาณขาออกที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ระบุส่วนดำเนินการ $y_m(k)$ ในกรณีที่เป็นการเรียนรู้ครั้งแรกของโครงข่ายประสาทเทียม ที่ $k=1$ ถึง 100

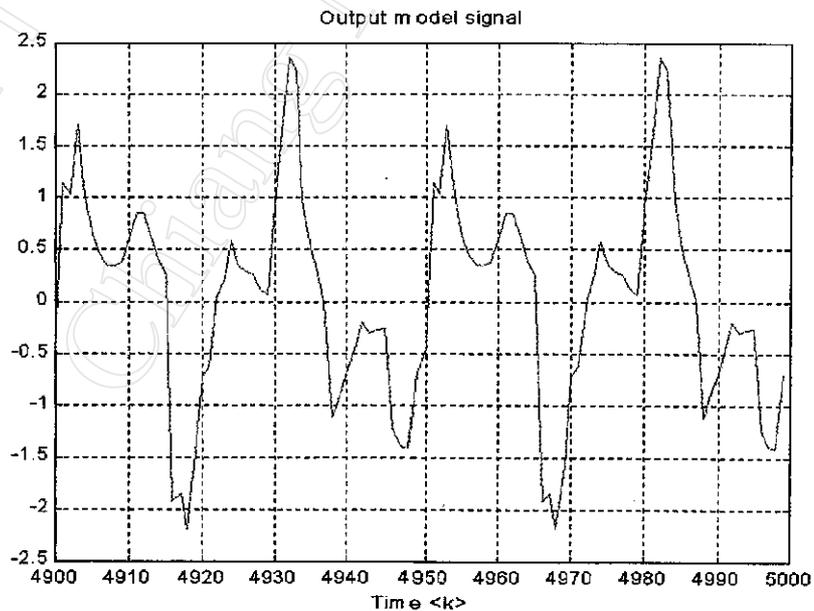


รูปที่ 4.46 สัญญาณ Plant information ที่คำนวณได้ ในกรณีที่เป็นการเรียนรู้ครั้งแรกของโครงข่ายประสาทเทียม ที่ $k=1$ ถึง 100

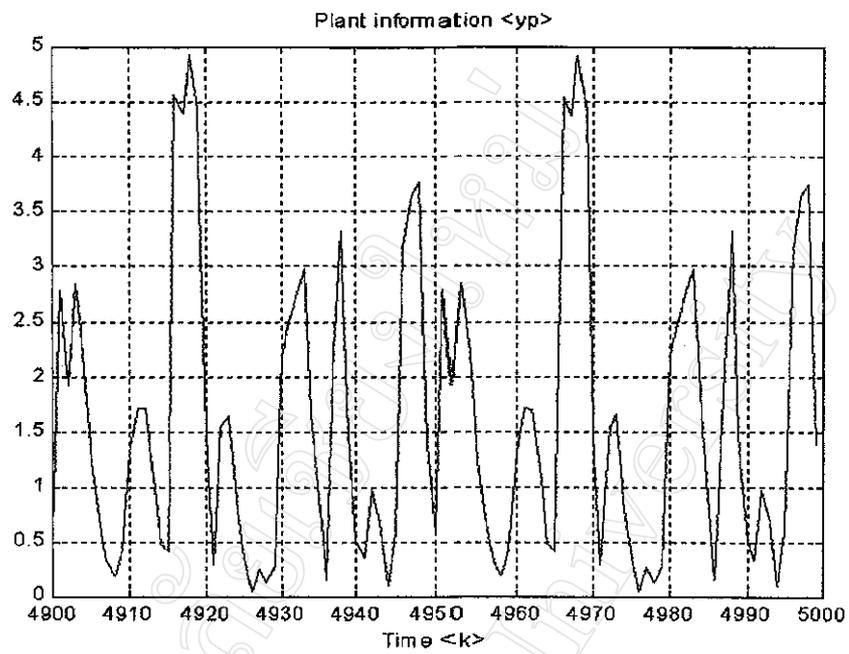
จากนั้นได้ทำการทดลองต่อไปอีกจนถึงค่าดัชนีเวลาที่ 5000 ได้ผลการทดลองออกมาดังนี้



รูปที่ 4.47 สัญญาณขาออกที่ได้จากระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการ ในกรณีที่เป็นการเรียนรู้ครั้งแรกของโครงข่ายประสาทเทียม ที่ $k=4900$ ถึง 5000



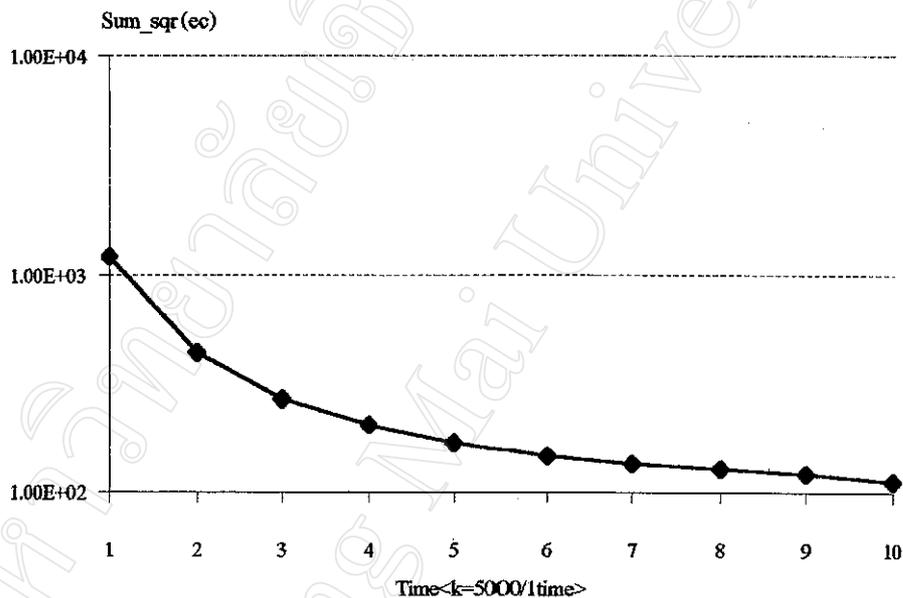
รูปที่ 4.48 สัญญาณขาออกที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ระบุส่วนดำเนินการ $y_m(k)$ ในกรณีที่เป็นการเรียนรู้ครั้งแรกของโครงข่ายประสาทเทียม ที่ $k=4900$ ถึง 5000



รูปที่ 4.49 สัญญาณ Plant information ที่คำนวณในกรณีที่เป็นการเรียนรู้ครั้งแรกของโครงข่ายประสาทเทียม ที่ $k=4900$ ถึง 5000

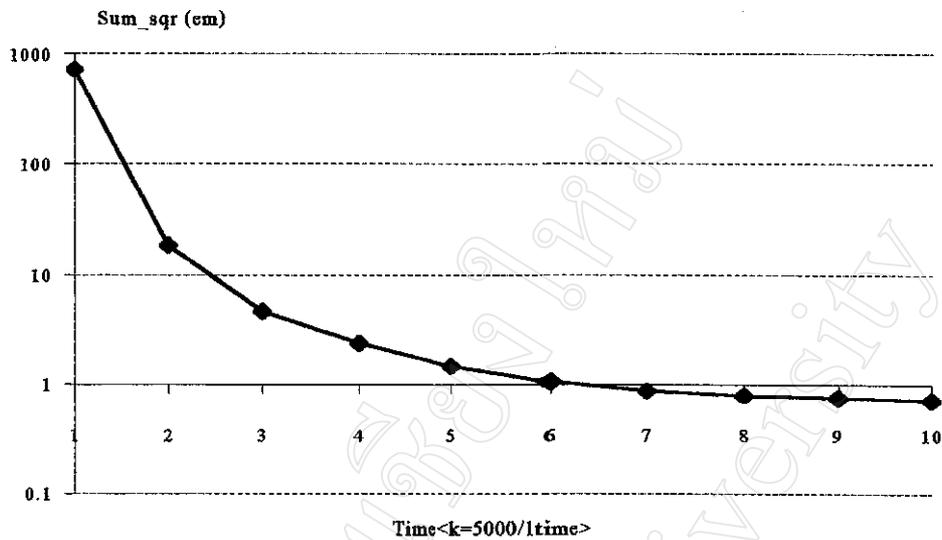
4.3.4 ผลที่ได้จากระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการในกรณีที่ผ่านมาแล้ว

จากผลการทดลองที่ได้ในหัวข้อข้างต้น พบว่าเมื่อได้ให้ระบบควบคุมและระบุส่วนดำเนินการทำงาน ณ เวลาที่นานขึ้น(โครงข่ายประสาทเทียมได้รับการเรียนรู้มากขึ้น) จะทำให้ได้ผลการตอบสนองที่ใกล้เคียงกับสัญญาณอ้างอิงมากที่สุด ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองในลักษณะเดียวกับส่วนดำเนินการที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 1 โดยให้ระบบทำงานซ้ำกันหลาย ๆ รอบ แต่ละรอบให้ค่า k มากที่สุดเป็น 5000 และทุกรอบของการทำงานโครงข่ายประสาทเทียมได้รับการปรับค่าน้ำหนักอย่างต่อเนื่อง ที่อัตราการเรียนรู้เป็น 0.001 ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.50 ผลรวมกำลังสองของสัญญาณข้อผิดพลาดของสัญญาณขาออกกับสัญญาณอ้างอิง ในส่วนดำเนินการที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 2 เมื่อรอบการทำงานเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.50 เมื่อให้ Sum_sqr(ec) เป็น ค่าผลรวมความผิดพลาดของระบบควบคุมยกกำลังสอง $\left(\sum_{k=1}^{k_{\max}} (r(k) - y(k))^2 \right)$ พบว่ามีค่าลดลงเมื่อจำนวนรอบการทำงานของระบบมากขึ้น ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกับผลการทดลองที่ได้จากส่วนดำเนินการที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 1

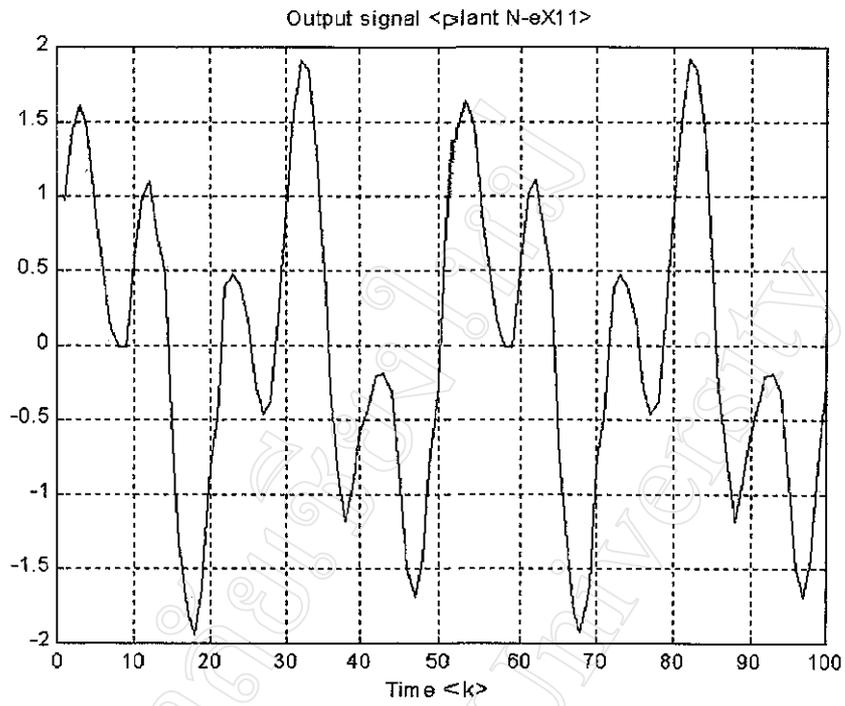


รูปที่ 4.51 ผลรวมกำลังสองของสัญญาณข้อผิดพลาดของสัญญาณขาออกกับสัญญาณขาออกที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ระดับดำเนินการ ในส่วนดำเนินการที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 2 เมื่อรอบการทำงานเพิ่มขึ้น

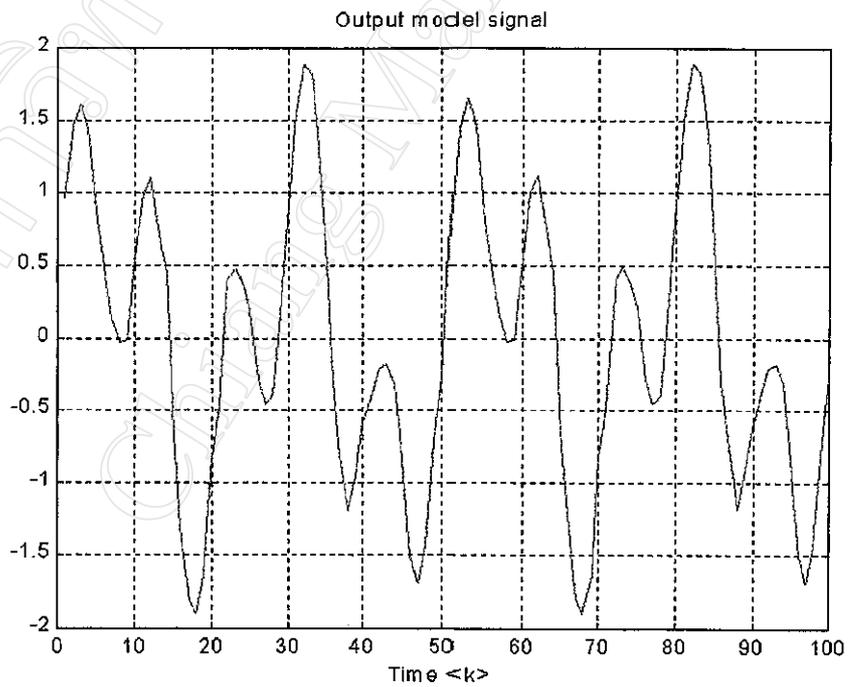
จากรูปที่ 4.51 เมื่อให้ Sum_sqr(em) เป็น $\left(\sum_{k=1}^{k_{\max}} (y(k) - y_m(k))^2 \right)$ หรือ ค่าผล

รวมความผิดพลาดของสัญญาณขาออกกับสัญญาณขาออกที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ระดับดำเนินการ พบว่ามีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อจำนวนรอบการทำงานของระบบมากขึ้นเช่นเดียวกับค่าผลรวมความผิดพลาดของระบบควบคุมยกกำลังสอง

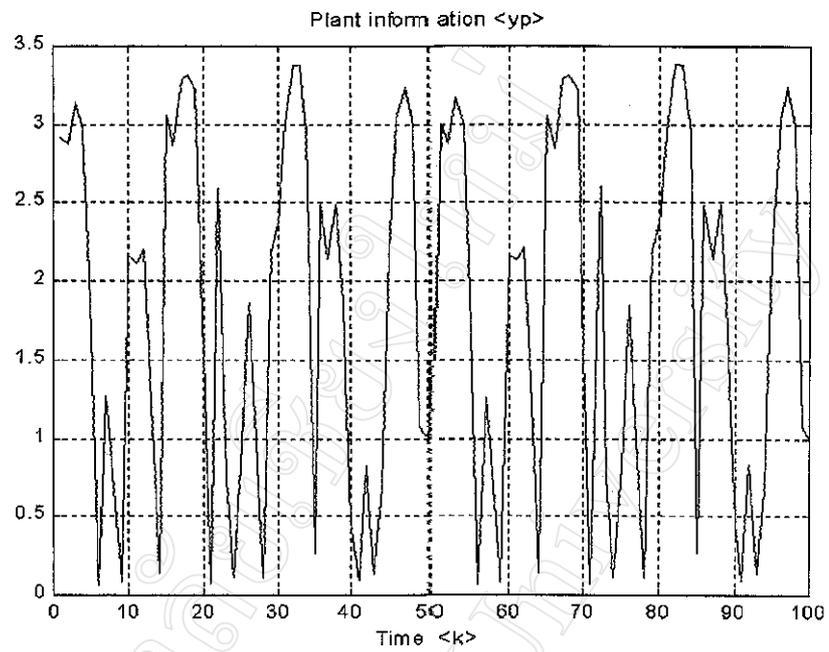
เมื่อโครงข่ายประสาทเทียมของระบบได้รับการปรับค่าน้ำหนักจากจำนวนรอบของการทำงานที่มากพอแล้ว ผลการตอบสนองที่ได้สามารถแสดงได้ดังนี้



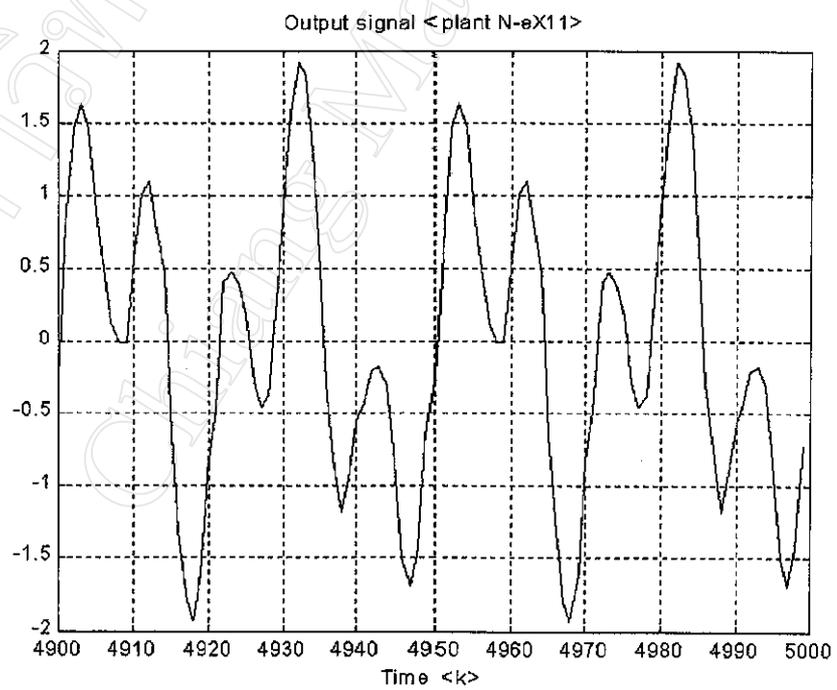
รูปที่ 4.52 สัญญาณขาออก $y(k)$ ที่ $k=1$ ถึง 100



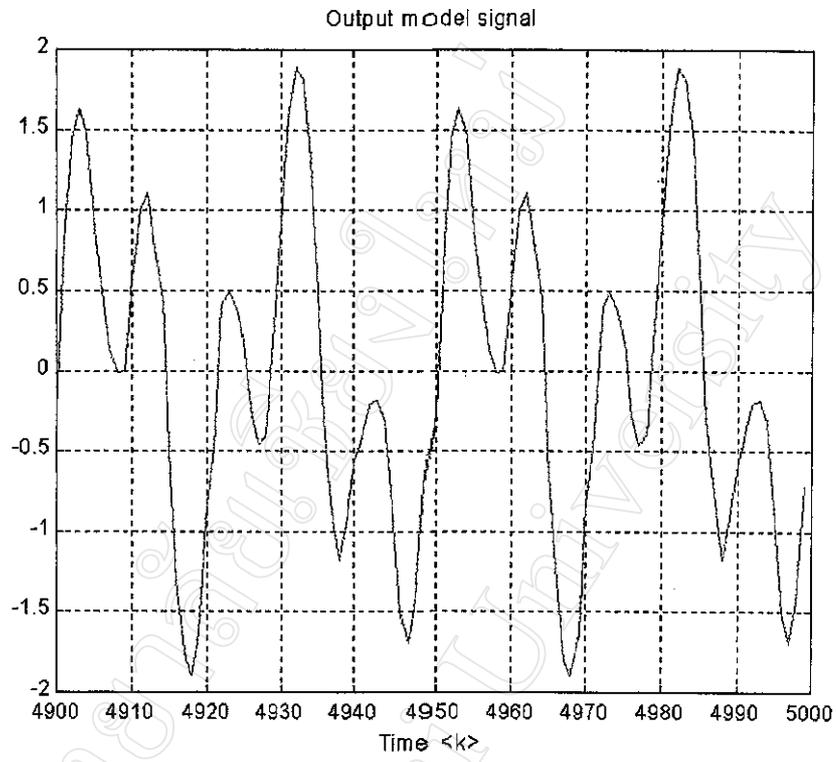
รูปที่ 4.53 สัญญาณจากโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ระบุส่วนดำเนินการ $y_m(k)$ ที่ $k=1$ ถึง 100



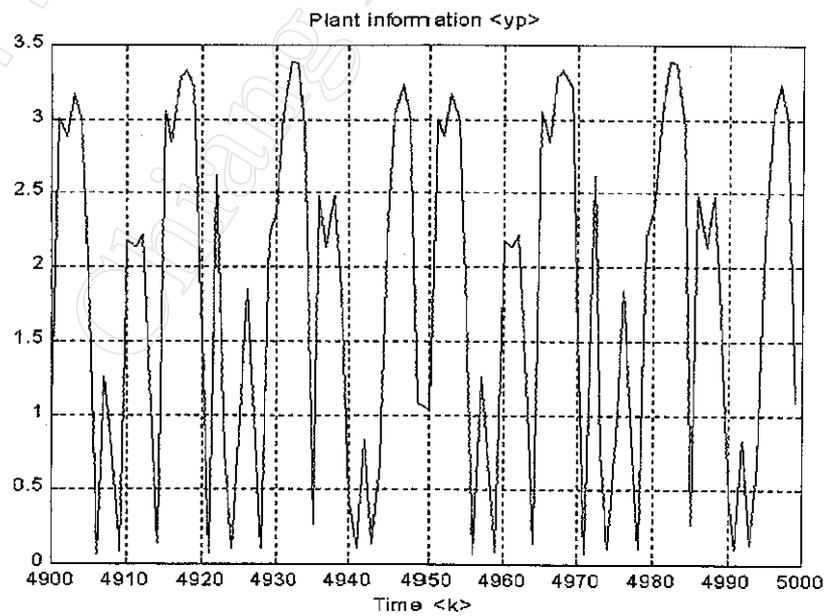
รูปที่ 4.54 สัญญาณ Plant information ที่ เวลา $k=1$ ถึง 100



รูปที่ 4.55 สัญญาณขาออก $y(k)$ ที่ $k=4900$ ถึง 5000



รูปที่ 4.56 สัญญาณจากโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ระบุส่วนดำเนินการ $y_m(k)$ ที่ $k=4900$ ถึง 5000



รูปที่ 4.57 สัญญาณ Plant information ที่ เวลา $k=4900$ ถึง 5000